



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

**APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS
INALÁMBRICAS DE BAJO CONSUMO
PARA ENTORNOS EXTERIORES
FERROVIARIOS**

Víctor Garrido Calvo

Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Pamplona, 21 de Junio de 2011



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
E.T.S.I.I. y de Telecomunicación
Campus de Arrosadía s/n
31006-Pamplona Navarra-España
Tfno: 34-48-169000 Fax: 34-48-169169



Acta de Proyecto Final de Carrera

Título:

*“APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS
INALÁMBRICAS DE BAJO CONSUMO PARA
ENTORNOS EXTERIORES FERROVIARIOS”*

Alumno:

Víctor Garrido Calvo

Tutor del Proyecto:

Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Reunido el tribunal, compuesto por los siguientes miembros,

Presidente,

Secretario,

Vocal 1º,

Fdo:.....

Fdo:.....

Fdo:.....

Acuerda otorgar la calificación de

Pamplona,.....de.....de 20.....

APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS DE BAJO CONSUMO PARA ENTORNOS EXTERIORES FERROVIARIOS

Víctor Garrido Calvo

Universidad Pública de Navarra
Radio Propagación de Ondas Electromagnéticas
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Tutor: Francisco Javier Falcone Lanas

Dedicado a todos mis familiares y amigos que siempre han estado ahí para apoyarme, en los buenos y en los malos momentos; en especial a mi abuelo, que siempre me ha servido como modelo de trabajo y de persona.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	2
2	OBJETIVOS.....	5
3	ESTADO DEL ARTE Y MÉTODOS DE SIMULACIÓN.....	7
3.1	Radio Propagación de Ondas Electromagnéticas.....	7
3.1.1	Fundamentos del Electromagnetismo.....	7
3.1.2	Polarización.....	9
3.1.3	Propiedades de las ondas electromagnéticas.....	9
3.2	Fenómenos de propagación.....	10
3.2.1	Reflexión y refracción.....	11
3.2.2	Difracción.....	12
3.3	Tecnologías inalámbricas.....	14
3.3.1	ZigBee.....	14
3.3.1.1	Conceptos básicos.....	14
3.3.1.2	Tipos de dispositivos.....	15
3.3.1.3	Topologías de red.....	16
3.3.1.4	Capas de protocolo.....	17
3.3.1.5	Aplicaciones.....	18
3.3.2	Bluetooth.....	18
3.3.2.1	Inicios de la tecnología Bluetooth.....	18
3.3.2.2	Descripción general.....	19
3.3.2.3	Características del transmisor.....	21
3.3.2.4	Características de recepción.....	22
3.3.2.5	Capas de protocolo.....	22
3.3.3	Wi-Fi.....	23
3.3.3.1	Introducción a Wi-Fi (802.11).....	23
3.3.3.2	Capas de protocolo.....	23
3.3.3.3	Los distintos estándares Wi-Fi.....	24
3.3.3.4	Rango y flujo de datos.....	25
3.3.3.4.1	802.11a.....	25
3.3.3.4.2	802.11b.....	25
3.3.3.4.3	802.11g.....	26
3.3.3.5	Modos de funcionamiento.....	26
3.3.3.5.1	Modo de infraestructura.....	27
3.3.3.5.2	Modo ad-hoc.....	28
3.4	Métodos empíricos de predicción de propagación.....	29
3.4.1	Método Rec. 370 (CCIR) para el medio rural.....	30
3.4.2	Método Okumura-Hata para el medio urbano.....	36
3.4.3	Método COST 231 para el medio urbano.....	38
3.4.4	Propagación en espacio libre.....	41
3.5	Métodos determinísticos de predicción de propagación.....	42
3.5.1	Técnicas de trazado de rayos.....	42
3.5.1.1	Método de simulación utilizado: trazado de rayos 3D.....	42
3.5.1.2	Otros métodos: el método de las imágenes y los métodos híbridos.....	44
3.5.2	Método FDTD.....	45
3.5.3	Método de momentos.....	45
3.6	Sistemas de comunicaciones ferroviarios actuales.....	45
3.6.1	Sistema tren tierra clásico (analógico).....	45
3.6.2	Sistemas digitales (GSM-R).....	46
3.6.3	Sistemas de trunking digital: TETRA.....	48
4	RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA.....	50
4.1	Descripción del escenario de simulación.....	50
4.2	Análisis de los resultados obtenidos.....	52
4.2.1	Análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario.....	53
4.2.2	Respuesta del enlace radioeléctrico frente a la sensibilidad.....	59

4.2.3 Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores.....	64
5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	79
6 AGRADECIMIENTOS.....	81
7 BIBLIOGRAFÍA.....	83
ANEXO A. Publicaciones URSI Elche XXVII Symposium Nacional 2012.....	84
ANEXO B. Herramientas utilizadas.....	92
ANEXO C. Código del escenario de simulación para trazado de rayos 3D.....	97
ANEXO D. Resultados adicionales.....	116

CAPÍTULO I

Introducción.

1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el sector ferroviario ha ido retrocediendo en el *ranking* de medios de transporte de mercancías (el 8% del total del transporte en la Unión Europea), perdiendo la partida con el transporte por carretera, que hoy en día ostenta una clara posición de supremacía (en torno al 67%). Esto ha sido motivado en gran medida por las grandes inversiones que se han realizado en la construcción y mejora de las carreteras, y por el escaso avance tecnológico que ha sufrido el ferrocarril de mercancías, siendo en estos momentos un sector tecnológicamente estancado y económicamente deficitario.

Es sobradamente conocido el impacto en la sostenibilidad que supone el transporte de mercancías por carretera, tanto en su vertiente económica (su coste económico y energético es elevado); como ambiental (elevadas emisiones de gases de efecto invernadero); como social (saturación de nuestras carreteras, lo que provoca el aumento de las posibilidades de ocurrencia de accidentes de tráfico). Por este motivo, en los últimos años, son constantes las medidas que desde las instituciones públicas abogan por la revitalización y fortalecimiento del ferrocarril como medio de transporte de mercancías sostenible. Este carácter sostenible del ferrocarril se sustenta en:

- Menor coste del transporte.
- Menor consumo energético.
- Menor impacto ambiental (emisiones de gases de efecto invernadero).
- Mayor volumen de mercancías transportadas (comparado con la carretera).
- Reducción de la saturación de nuestras carreteras.

Prueba de la implicación y compromiso de las instituciones públicas en pos del transporte ferroviario de mercancías, es la fuerte inversión en infraestructuras, y los cambios de la legislación relativa a transporte para potenciar la liberación del sector ferroviario. El objetivo último que se persigue con estas medidas, es la revitalización del sector gracias al aumento de la competitividad, y el uso combinado de medios de transporte que en la actualidad son excluyentes (carretera, barco y ferrocarril) de una manera combinada.

El presente proyecto, se enclava dentro del ámbito del transporte ferroviario de mercancías y tiene por objeto el desarrollo de un nuevo sistema (hardware y software) de trazabilidad de mercancías que permita: (1) ofrecer nuevos servicios a todos los agentes de la cadena de valor del transporte ferroviario de mercancías (operadores ferroviarios de mercancías, operadores logísticos, gestores de infraestructura ferroviaria y cliente final) y (2) aumentar la demanda de este tipo de transporte (favoreciendo así el desarrollo sostenible).

En este sentido, se han desarrollado iniciativas con el fin de poder potenciar el uso de la red ferroviaria para el transporte de mercancías, dado el potencial que presenta desde el punto de vista de eficiencia de coste como de tiempo. Uno de los grandes retos es el de poder llevar a cabo una gestión integral logístico, controlando la trazabilidad de las mercancías, tanto por parte del operador ferroviario, como por los agentes logísticos y por el cliente final. En este sentido, juegan un papel fundamental las tecnologías inalámbricas, dado que se posibilita interacción de manera ubicua con la mercancía transportada en todo momento.

El resultado del proyecto se materializará en una nueva línea de productos embarcados y herramientas software para los centros de control ferroviario, que ofrezcan una serie de servicios para el ámbito del transporte ferroviario de mercancías, que pese a que ya se ofrecen en el ámbito de la carretera, todavía son una utopía en el ámbito ferroviario.

Es factible el uso de diversos tipos de sistemas y tecnologías inalámbricos para poder llevar a cabo dicho proceso de trazabilidad. Tradicionalmente, las comunicaciones ferroviarias se han apoyado en redes móviles, tanto en las PLMN basadas en GSM/UMTS como en redes más específicas del sector ferroviario, como es el caso de GSM-R y en algunos casos, sistemas de *trunking* digital como TETRA.

Dicha funcionalidad, básica de comunicación entre el tren en su conjunto y la infraestructura de comunicaciones, se puede ver complementada por el empleo de redes tanto WLAN para intercomunicación con la infraestructura ferroviaria, como redes WPAN para intercomunicación entre vagones o en el interior de los mismos.

A la hora de poder evaluar el empleo de este tipo de tecnologías en el entorno ferroviario, es necesario considerar el comportamiento del canal radioeléctrico en las condiciones particulares de funcionamiento del mismo. En este trabajo, se analiza el comportamiento de dicho canal para el caso de intercomunicar vagones de tren entre ellos, mediante el empleo de un sistema WPAN (tal como ZigBee o Bluetooth) [1]. El motivo de dicha elección es poder implementar un sistema de bajo coste y bajo consumo energético, considerando que para operativa de telecontrol y telemando es factible contar con un ancho de banda moderado [1].

Se presentará el análisis del canal radioeléctrico aplicable al sistema ZigBee para la interconexión entre vagones y/o con la locomotora o vagón principal. Cada vagón contará con un nodo ZigBee que tendrá información referente al contenedor y a las mercancías que viajen en su interior. Esta información se irá transmitiendo entre los vagones hasta que llegue a la locomotora o a un vagón principal que tenga capacidad de comunicación con el exterior, para ser enviada al destino final del mismo. En la siguiente Figura 1 se muestra una ilustración del funcionamiento del sistema:

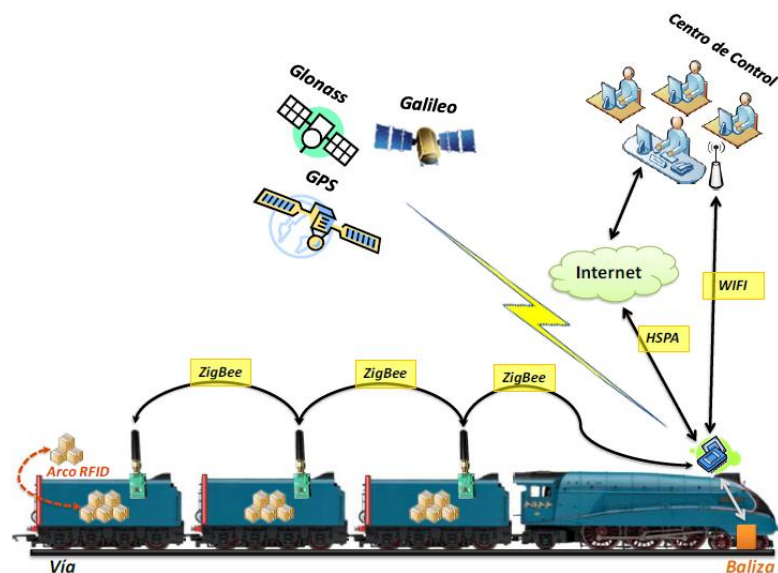


Fig. 1. Ilustración del funcionamiento del sistema.

El uso de la tecnología ZigBee para la transmisión de información entre los diferentes vagones que componen un tren, representa en sí mismo un reto tecnológico, puesto que no se conocen experiencias satisfactorias de uso de la misma en el ámbito ferroviario, dado es escaso tiempo de vida que tiene la tecnología. Esta tecnología supondría una gran revolución para intercambiar información entre vagones, puesto que es uno de los caballos de batalla que existen hoy en día en el mundo ferroviario. Además, esta misma tecnología podría solventar muchos de los problemas a los que se enfrentan hoy en día las compañías de metro o transporte de pasajeros cuando tienen que acoplar distintos trenes para que circulen agrupados como una única unidad.

CAPÍTULO II

Objetivos.

2 OBJETIVOS

El objetivo del proyecto es el análisis del funcionamiento de tecnologías inalámbricas de bajo consumo, tales como ZigBee, aplicadas en el transporte ferroviario de mercancías para la interconexión entre vagones y/o con la locomotora o vagón principal que permitan:

- Localizar, posicionar e identificar el material móvil (trenes / vagones / contenedores) y las mercancías transportadas.
- Intercambiar información de manera ágil y flexible entre el material móvil y los Centros de Control Ferroviarios.
- Ayudar al maquinista en la gestión de las incidencias acaecidas durante el transporte.
- Facilitar el proceso de Planificación y Re planificación de rutas y carga/descarga de mercancías.

Cada uno de los vagones será un nodo ZigBee que tendrá información relativa al contenedor y las mercancías que viajan en dicho contenedor. Esta información se irá pasando de vagón a vagón, hasta que llegue a la locomotora o a un vagón que tenga capacidad de comunicación con el exterior, para que pueda ser enviada a tierra.

Dicho tipo de sistemas encuentran gran aceptación por su bajo coste, su reducido consumo energético y su gran flexibilidad para la definición de redes de elementos que desean intercambiar información entre sí.

Debido a las características complejas del canal de RF, es necesario estudiar el efecto del entorno, interferencia y posición de los transceptores. Para ello, se cuenta con los siguientes elementos:

- Medidas empíricas de RF.
- Simulaciones sobre modelos empíricos.
- Simulaciones sobre trazado de rayos 3D deterministas.
- Análisis de impacto sobre sistemas de posible implantación en el entorno ferroviario, tales como RFID, ZigBee o Bluetooth.

CAPÍTULO III

Estado del arte y métodos de simulación.

3 ESTADO DEL ARTE Y MÉTODOS DE SIMULACIÓN

3.1 Radio Propagación de Ondas Electromagnéticas

El objetivo de este proyecto es caracterizar el canal electromagnético, concretamente para la interconexión entre vagones de tren, por lo tanto es vital comprender la base de la teoría de radio propagación de ondas electromagnéticas [13].

Se hablará de los fundamentos del electromagnetismo, la radio propagación electromagnética y se expondrán las Ecuaciones de Maxwell, que son la base de toda la teoría electromagnética. A continuación se expondrán los fenómenos asociados a dicha teoría como son la reflexión, la difracción y la refracción.

3.1.1 Fundamentos del Electromagnetismo

Las ecuaciones de Maxwell son la base teórica que gobierna todos los fenómenos electromagnéticos. Usándolas se pueden resolver todos los problemas electromagnéticos de una manera total, obteniendo así una solución concreta en cada punto del espacio.

Las ecuaciones básicas de Maxwell para campos electromagnéticos temporales armónicos se suelen escribir de la siguiente manera:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega\varepsilon\vec{E} + \vec{J} \quad (3.2)$$

Donde:

- \vec{E} [V/m] es el vector de fuerza campo eléctrico.
- \vec{H} [A/m] es el vector de fuerza campo magnético.
- \vec{J} [A/m²] es el vector de fuente de corriente.
- $\omega = 2\pi f$ [rad/s] es la frecuencia angular.
- f [Hz] es la frecuencia.
- μ [H/m] es la permeabilidad del medio.
- ε [F/m] es la permitividad del medio.

En 4.1 y 4.2 se ha omitido el factor temporal armónico $e^{-j\omega t}$ y \vec{E} , \vec{H} y \vec{J} son vectores que solo dependen de su posición espacial. Un vector temporal armónico \vec{K} se puede expresar de la forma $\vec{K}(x, y, z, t) = \vec{K}e^{j\omega t}$ donde $\vec{K} = \vec{K}(x, y, z)$. Por simplicidad, μ y ε son reales.

Cuando existe una fuente de corriente (una antena) se pueden usar las ecuaciones 4.1 y 4.2 para calcular \vec{E} y \vec{H} en cada punto del espacio excepto en la fuente de corriente, donde $\vec{J} \neq 0$.

Para hacer la solución más simple, normalmente se suele usar el potencial vector \vec{A} , que está relacionado con \vec{H} de la siguiente forma:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \quad (3.3)$$

También se puede relacionar el potencial vector con \vec{E} como:

$$\vec{E} = \frac{1}{j\omega\mu\varepsilon} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - j\omega\vec{A} \quad (3.4)$$

Para obtener el potencial vector \vec{A} se puede usar la ecuación de onda de Helmholtz.

$$\nabla^2 \vec{A} + \beta^2 \vec{A} = -\mu\vec{J} \quad (3.5)$$

Donde $\beta = \omega^2 \mu \epsilon [\text{rad/m}]$ es el número de onda. De esta forma, una vez obtenido el potencial vector \vec{A} mediante la ecuación 4.5 es fácil obtener \vec{E} usando 4.4 y \vec{H} con 4.3.

Si la densidad de corriente \vec{J} está definida en cada punto del volumen de la antena V una solución para la ecuación 4.5 en el punto de observación P está dada por:

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \vec{J}(P') e^{-j\beta r} / r dV' \quad (3.6)$$

Donde $r = \overline{P'P} = \sqrt{r_0^2 + r'^2 - 2r_0r' \cos \alpha}$ es la distancia entre un punto de la fuente P' y el punto de observación P , r_0 y r' las distancias entre el origen de coordenadas y los puntos de observación y de la fuente, y α es el ángulo entre las direcciones de r_0 y r' .

La solución anterior de la ecuación de onda para el potencial vector da la dependencia radial de la amplitud, fase y polarización de la onda esférica que se propaga en el medio. El frente de onda se define como una superficie donde la onda tiene la misma fase, y es normal a la dirección de propagación de la onda. Cada punto de la fuente o densidad volumétrica elemental $dV' = dx' dy' dz'$ crea una onda esférica.

Cuando se observa la onda desde una distancia muy grande, se ve que la onda esférica se ha convertido en una onda plana, y si además de ser una onda plana, la amplitud de la onda es constante en el frente de ondas, esta es una onda plana uniforme (TEM).

En las comunicaciones inalámbricas, se está interesado en la región lejana de las ondas electromagnéticas, o región de Fraunhofer, donde el punto de observación está lejos de la antena. En este caso se asume que los rayos que salen de la antena viajan en paralelo, por lo que la distancia r en 4.6 se puede aproximar como $1/r \approx 1/r_0$ para el factor de la amplitud y como $r \approx r_0 - r' \cos \alpha$ en el factor de la fase. Por tanto, el vector potencia \vec{A} en campo lejano queda como:

$$\vec{A}(P) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-j\beta r_0}}{r_0} \iiint \vec{J}(P') e^{-j\beta r' \cos \alpha} / r dV' \quad (3.7)$$

Resulta conveniente expresar $r' \cos \alpha$ en las coordenadas rectangulares de la fuente (x', y', z') y los ángulos (\varnothing, ϑ) de manera que:

$$r' \cos \alpha = x' \cos \varnothing \cos \vartheta + y' \sin \varnothing \sin \vartheta + z' \cos \vartheta \quad (3.8)$$

De esta manera si se expresa también $\vec{J}(P)$ y $\vec{A}(P)$ en sus correspondientes coordenadas rectangulares, se tiene $\vec{J}(P) = \hat{x}J_x(P') + \hat{y}J_y(P') + \hat{z}J_z(P')$ y $\vec{A}(P) = \hat{x}A_x(P') + \hat{y}A_y(P') + \hat{z}A_z(P')$ con \hat{x}, \hat{y} y \hat{z} vectores unitarios en cada dirección. Sustituyendo en la ecuación 4.7 se tiene:

$$A_{x,y,z}(P) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-j\beta r_0}}{r_0} \iiint J_{x,y,z}(P') e^{-j\beta(x' \cos \varnothing \cos \vartheta + y' \sin \varnothing \sin \vartheta + z' \cos \vartheta)} dx' dy' dz' \quad (3.9)$$

Por último, se puede ver que las componentes de \vec{E} y \vec{H} en campo lejano son:

$$\begin{aligned} E_\vartheta &= -j\omega A_\vartheta \\ E_\varnothing &= -j\omega A_\varnothing \\ E_r &= 0 \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} H_{\vartheta} &= -\frac{E_{\vartheta}}{\eta} \\ H_{\varphi} &= -\frac{E_{\varphi}}{\eta} \\ H_r &= 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Donde η es la impedancia intrínseca del medio y

$$A_{\vartheta} = A_x \cos \vartheta \cos \varphi + A_y \sin \vartheta \cos \varphi - A_z \sin \vartheta \quad (3.12)$$

$$A_{\varphi} = A_x \sin \vartheta + A_y \cos \vartheta \quad (3.13)$$

3.1.2 Polarización

Las propiedades vectoriales de la antena están caracterizadas por la polarización de la onda. La polarización de la onda se determina por la orientación del vector campo eléctrico en función de su posición espacial y del tiempo.

Como ya se ha dicho en 4.1, la onda electromagnética creada por una antena en campo lejano, es aproximadamente una onda electromagnética plana (TEM). Como los campos \vec{E} y \vec{H} están relacionados mediante la impedancia intrínseca del medio η se operará solo con el campo eléctrico.

Al propagarse la onda plana en la dirección radial \hat{r} el campo eléctrico total será suma de sus componentes en las direcciones $\hat{\theta}$ y $\hat{\varphi}$.

$$\vec{E} = E_{\theta} \hat{\theta} + E_{\varphi} \hat{\varphi} = |E_{\theta_0}| e^{j(\zeta_{\theta_0} - \beta r)} \hat{\theta} + |E_{\varphi_0}| e^{j(\zeta_{\varphi_0} - \beta r)} \hat{\varphi} \quad (3.14)$$

Donde $|E_{\theta_0}|$ y $|E_{\varphi_0}|$ son los módulos de las componentes y ζ_{θ_0} , ζ_{φ_0} las fases iniciales de cada componente del campo eléctrico.

$$\begin{aligned} \text{Re}[\vec{E}(r, t)] &= \text{Re}(E_{\theta_0} e^{j(\omega t - \beta r)} \hat{\theta} + E_{\varphi_0} e^{j(\omega t - \beta r)} \hat{\varphi}) = \\ &= \hat{\theta} |E_{\theta_0}| \cos(\omega t - \beta r + \zeta_{\theta_0}) + \hat{\varphi} |E_{\varphi_0}| \cos(\omega t - \beta r + \zeta_{\varphi_0}) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Donde $E_{\theta_0} = |E_{\theta_0}| e^{j\zeta_{\theta_0}}$ y $E_{\varphi_0} = |E_{\varphi_0}| e^{j\zeta_{\varphi_0}}$ son las amplitudes complejas iniciales de cada componente. La polarización de la onda depende de las relaciones entre magnitud y fase de los componentes, dando lugar a los siguientes casos típicos:

1. Polarización lineal: sucede cuando $\Delta\zeta_0 = \zeta_{\varphi_0} - \zeta_{\theta_0} = 0$ ó $\pm\pi$.
2. Polarización circular: el módulo de ambas componentes a de ser el mismo $|E_{\theta_0}| = |E_{\varphi_0}|$ y la diferencia de fase $\Delta\zeta_0 = \zeta_{\varphi_0} - \zeta_{\theta_0} = \pm\pi/2$.
3. Polarización elíptica: las componentes tienen módulos diferentes y la diferencia de fase cumple $-\pi/2 < \Delta\zeta_0 < \pi/2$.

Se puede demostrar que las polarizaciones lineales y circulares son casos concretos de la polarización elíptica.

3.1.3 Propiedades de las ondas electromagnéticas

Cuando la onda electromagnética se propaga en un medio con una permitividad compleja $\epsilon = \epsilon' - j\left(\frac{\sigma}{\omega}\right)$ y una permeabilidad real μ , la constante de fase β de la ecuación de onda es sustituida por

la constante de propagación compleja γ dada por:

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon(1 - j\tan\delta_e)} \quad (3.16)$$

Donde

- α [Np/m] es la constante de atenuación.
- β [rad/m] es la constante de fase.
- $\tan\delta_e = \left(\frac{\sigma}{\omega}\right) = \left(\frac{\sigma}{2\pi f\epsilon}\right)$ es la tangente de pérdidas del dieléctrico.
- σ [S/m] es la conductividad del medio.

Se pueden calcular α y β mediante las siguientes ecuaciones

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{\frac{1}{2}(-1 + \sqrt{1 + \tan^2\delta_e})} \quad (3.17)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{\frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + \tan^2\delta_e})} \quad (3.18)$$

Además de la constante de propagación γ es posible calcular la impedancia intrínseca del medio η mediante la siguiente fórmula.

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon(1 - j\tan\delta_e)}} = |\eta| e^{j\phi_\eta} \quad (3.19)$$

$$\text{Donde } |\eta| = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}\sqrt{\cos\delta} \text{ y } \phi_\eta = \frac{1}{2}\arctan\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right).$$

También es necesario calcular la velocidad de fase v y la longitud de onda λ en un medio general con pérdidas como

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{\frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + \tan^2\delta_e})}} \quad (3.20)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{f\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{\frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 + \tan^2\delta_e})}} \quad (3.21)$$

Para calcular todos estos parámetros, es necesario caracterizar antes los diferentes materiales con los que puede interactuar la onda electromagnética.

3.2 Fenómenos de propagación

En un sistema de comunicaciones real la señal llega al receptor de manera simultánea por múltiples caminos diferentes, creando lo que se conoce como el fenómeno de multitrayecto.

Estas ondas se combinan vectorialmente creando la señal resultante, cuya variación depende de la distribución de las fases de las ondas incidentes. Las variaciones de la amplitud de esta señal se conocen como efecto *fading*.

Este fenómeno depende tanto de la localización de los obstáculos estáticos, como de los que están en movimiento (efecto *Doppler*). Por este motivo, se puede hablar de las variaciones en el espacio, tiempo y frecuencia de los campos electromagnéticos para diferentes entornos.

3.2.1 Reflexión y refracción

Las ecuaciones de Maxwell describen los campos electromagnéticos en un medio continuo, pero cuando una onda electromagnética que se propaga por un medio y llega al plano que separa este medio ($\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$) de otro diferente ($\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$) es necesario recurrir a las condiciones de contorno para resolver el problema.

- Los componentes tangenciales del campo eléctrico \vec{E} son continuos en la superficie de separación entre los medios $\rightarrow E_{\tau 1} = E_{\tau 2}$.
- Los componentes normales del campo eléctrico \vec{E} son continuos en la superficie de separación entre los medios $\epsilon_1 E_{n1} - \epsilon_2 E_{n2} = \rho_s$. Donde ρ_s [C/m^2].
- Si $\sigma_2 = \infty$ el campo eléctrico en el medio 2 es cero $\rightarrow E_{\tau 1} = E_{\tau 2} = E_{n2} = 0$ y $E_{n1} = \frac{\rho_s}{\epsilon_1}$.
- Los componentes normales y tangenciales del campo magnético \vec{H} no son continuos en la superficie de separación entre los medios $\rightarrow \mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2}$ y $H_{\tau 1} - H_{\tau 2} = J_s$ donde J_s [A/m] es la densidad superficial de corriente.
- Si $\sigma_2 = \infty$ el campo magnético en el medio 2 es cero $\rightarrow H_{\tau 1} = H_{n2} = H_{n1} = 0$ y $H_{\tau 1} = J_s$.
- Si no existe una densidad superficial de corriente en la interfaz $J_s = 0$ los componentes tangenciales de H son continuos en el medio $H_{\tau 1} = H_{\tau 2}$.

Cuando una onda electromagnética plana llega al plano que separa dos medios diferentes ($\epsilon_1, \mu_1, \sigma_1$) y ($\epsilon_2, \mu_2, \sigma_2$) se divide en dos ondas electromagnéticas diferentes, la onda transmitida y la reflejada. Por simplicidad, en esta sección se considerarán medios dieléctricos sin pérdidas ni magnéticos $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ y $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$.

Estas ondas transmitidas y reflejadas siguen las leyes de la reflexión 4.36 y la transmisión 4.37, que dictan las relaciones entre el ángulos de la onda incidente (ζ_i), reflejada (ζ_r) y transmitida (ζ_t) respecto de la normal del punto de impacto en el plano de incidencia.

$$\zeta_r = \zeta_i \quad (3.36)$$

$$\frac{\sin \zeta_i}{\sin \zeta_t} = \frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (3.37)$$

Donde:

- $\beta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = \beta_0 n_1$ Constante de fase del medio 1.
- $\beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} = \beta_0 n_2$ Constante de fase del medio 2.
- $n_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}}$ Índice de refracción del medio 1.
- $n_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_0}}$ Índice de refracción del medio 2.
- $n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}}$ Índice de refracción del medio 1.
- $\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ Constante de fase del espacio libre.

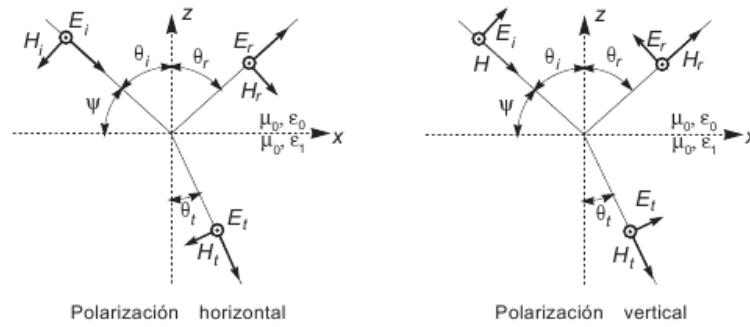


Fig. 2. Incidencia de una onda plana en un medio dieléctrico.

Además de los ángulos $(\zeta_i, \zeta_r, \zeta_t)$ es necesario calcular las relaciones entre el campo incidente, reflejado y transmitido. Esta relación se mide mediante dos parámetros, el coeficiente de reflexión $R = \frac{E_r}{E_i} = |R|e^{-j\zeta_r}$ y el coeficiente de transmisión $T = \frac{E_t}{E_i} = |R|e^{-j\zeta_t}$.

Se define el plano de incidencia como el plano formado por el vector unitario normal a la superficie de separación entre los dos medios y el vector de dirección de incidencia de la onda.

Si se descompone la polarización de la onda en el plano al plano de incidencia, y en el plano perpendicular al mismo, se pueden calcular los coeficientes de reflexión y transmisión de la onda con polarización perpendicular al plano de incidencia (R^\perp, T^\perp) sabiendo que $n_1 = n_0/n_1$ y $n_2 = n_0/n_2$.

$$R^\perp = \frac{E_r^\perp}{E_i^\perp} = (n_2 \cos \zeta_i - n_1 \cos \zeta_t) / (n_2 \cos \zeta_i + n_1 \cos \zeta_t) \quad (3.38)$$

$$T^\perp = \frac{E_t^\perp}{E_i^\perp} = (2n_2 \cos \zeta_i) / (n_2 \cos \zeta_i + n_1 \cos \zeta_t) \quad (3.39)$$

y los coeficientes de reflexión y transmisión de la onda con polarización paralela al plano de incidencia $(R^\parallel, T^\parallel)$ como:

$$R^\parallel = \frac{E_r^\parallel}{E_i^\parallel} = (n_1 \cos \zeta_i - n_2 \cos \zeta_t) / (n_1 \cos \zeta_i + n_2 \cos \zeta_t) \quad (3.40)$$

$$T^\parallel = \frac{E_t^\parallel}{E_i^\parallel} = (2n_2 \cos \zeta_i) / (n_1 \cos \zeta_i + n_2 \cos \zeta_t) \quad (3.41)$$

3.2.2 Difracción

La difracción es uno de los fenómenos electromagnéticos que hacen posible recibir señal en el receptor cuando existe un obstáculo que impide la visión directa entre el emisor y el receptor.

Este fenómeno se puede explicar gracias al principio de Huygens, que enuncia que cada punto de frente de ondas se comporta como una nueva fuente de ondas esféricas que se extienden en todas las direcciones del espacio (Figura 3). De esta manera, aun cuando dos transceptores no tienen visión directa, la señal de uno llega al otro.

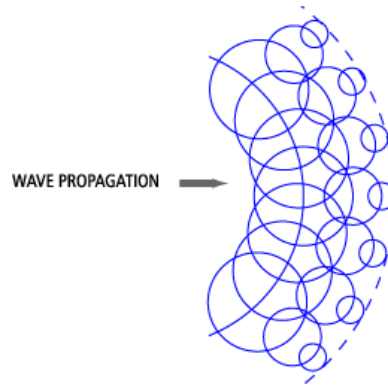


Fig. 3. Principio de Huygens.

Fresnel completó el principio de Huygens teniendo en cuenta la periodicidad de las ondas en el espacio y en el tiempo, su interferencia mutua y la polarización de estas. Según Fresnel, el frente de onda toma un significado físico como una superficie donde las ondas secundarias con unas ciertas amplitudes y direcciones se interfieren. El principio de Huygens modificado y perfeccionado por Fresnel toma el nombre de Principio de Huygens-Fresnel, y es un método fundamental para solucionar problemas de difracción.

Para definir las zonas de Fresnel se parte de dos antenas isotropas separadas una distancia R . A una distancia d_1 de la antena transmisora se encuentra un obstáculo, y en ese punto se define un plano infinito P perpendicular a la línea que une ambas antenas (Figura 4).

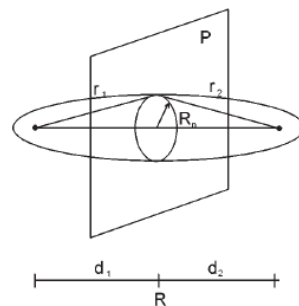


Fig. 4. Definición de las zonas de Fresnel.

Se definen las zonas de Fresnel como aquellos puntos del espacio que cumplen la siguiente condición:

$$(r_1 + r_2) - R = \frac{n\lambda}{2}; n = 1, 2, \dots$$

Cada n es una zona de Fresnel. Estas zonas son elipsoides de revolución cuyo eje mas grande tiene una longitud de $R + \frac{n\lambda}{2}$. La intersección de las zonas de Fresnel con el plano P son circunferencias cuyo radio puede calcularse cuando este sea mucho menor que d_1 y d_2 como:

$$R_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad (3.43)$$

Si se aplica el principio de Huygens a estos círculos, el campo sobre la antena receptora puede formarse como la superposición de fuentes elementales de ondas esféricas situadas en el plano P, radiando cada una de estas fuentes con un desfase que depende de la distancia r_1 . A estas fuentes se les llama fuentes secundarias.

A partir de la definición de las zonas de Fresnel, se puede ver que los campos producidos por las fuentes equivalentes de Huygens situadas en la zona 1 ($n = 1$) se sumarán en la antena receptora con una fase inferior a 180°, mientras que las contribuciones de las fuentes 2 y 3 se anulan mutuamente, al igual que las contribuciones de las zonas 4 y 5, 6 y 7 etc.

De esta forma, se puede ver que si se sitúa un plano conductor en P con un orificio de radio R_1 la potencia recibida por el receptor no disminuirá de forma apreciable. Por tanto, el radio de la primera zona de Fresnel permite definir la condición de visibilidad entre antenas, de forma que mientras no exista un obstáculo dentro de la primera zona de Fresnel se considera que la trayectoria no ha sido obstruida.

Por el contrario, cuando el obstáculo se encuentra dentro de la primera zona de Fresnel existirá una disminución apreciable de la potencia recibida, por lo que se considera que la trayectoria ha sido obstruida y deberá considerarse el efecto de la difracción.

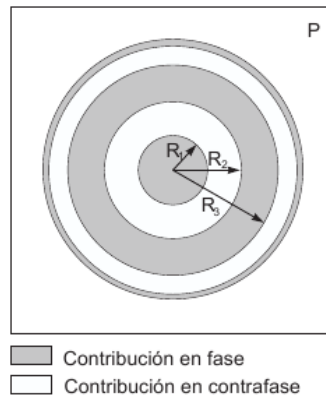


Fig. 5. Fase del campo producido por las fuentes secundarias sobre el receptor.

3.3 Tecnologías inalámbricas

En este capítulo se van a ver con detalle algunas tecnologías inalámbricas de bajo consumo, tales como ZigBee, Wifi o Bluetooth y se procederán a explicar los métodos de simulación utilizados para llevar a cabo este proyecto, basados en el método de trazado de rayos 3D.

3.3.1 ZigBee

3.3.1.1 Conceptos básicos

ZigBee [1] es un estándar que define un conjunto de protocolos de comunicación para redes inalámbricas de corto alcance y baja tasa de datos. ZigBee opera en las bandas de frecuencia de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz. Tiene como objetivos primordiales crear aplicaciones de baja tasa de datos, bajo coste y baterías de larga duración, eso como principales requisitos. La máxima tasa de datos es de 250 Kbps.

El estándar ZigBee ha sido desarrollado por ZigBee Alliance, que tiene cientos de empresas asociadas, de la industria de los semiconductores y desarrolladores de software a los fabricantes de equipos originales (OEM) y los instaladores. La ZigBee Alliance se formó en 2002 como una organización sin fines de lucro abierta a todo el mundo que quiera participar.

El estándar ZigBee ha adoptado IEEE 802.15.4 como su capa física (PHY) y control de acceso medio (MAC) de protocolos. Por lo tanto, un dispositivo compatible con ZigBee es compatible con el estándar IEEE 802.15.4 de igual manera.

El concepto de usar comunicación inalámbrica para obtener información o realizar determinadas tareas de control dentro de una casa o una fábrica no es nuevo. Existen varios estándares para comunicación inalámbrica de corto alcance, incluyendo IEEE 802.11 Wireless Local Area Network (WLAN) y Bluetooth. Cada uno de estos estándares tiene sus ventajas en aplicaciones particulares.

El estándar ZigBee ha sido desarrollado específicamente para hacer frente a la necesidad de implementar redes inalámbricas de muy bajo coste de baja tasa de datos con el consumo de energía mínimo.

Otras características muy interesantes de esta tecnología son.

- Los Chips ZigBee son muy baratos (en torno a 3 \$)
- Encendidos *Wake-Up* muy rápidos (15ms) por lo que los dispositivos pueden pasar la mayor parte del tiempo “durmiendo” ahorrando así mucha batería.
- Posibilidad de elegir entre ZigBee para aplicaciones del hogar y usos comerciales simples, o ZigBee PRO, que posee una mayor potencia al tener posibilidad de *multi-casting*, algoritmos de enrutado *many-to-one* o mayor seguridad mediante algoritmos de cifrado de llave simétrica.

3.3.1.2 Tipos de dispositivos

Existen dos tipos de dispositivos: aquellos con funciones completas (dispositivos FFDs) y otros dispositivos de funciones reducidas (DSR). Un FFD es capaz de aceptar cualquier papel en la red.

Un RFD, por otro lado, tiene capacidades limitadas. Por ejemplo, un FFD puede comunicarse con cualquier otro dispositivo en una red, pero un RFD sólo puede comunicarse con un dispositivo FFD.

Los RFD son dispositivos que están diseñados para aplicaciones muy simples, como encender o apagar un interruptor. La potencia de procesamiento y el tamaño de memoria de los dispositivos RFD son normalmente inferiores a los de los dispositivos FFD.

- Coordinador ZigBee (ZigBee Coordinator, ZC). Es el dispositivo más completo. Es la raíz de la red y el puente a otras redes. Solo hay un ZC en cada red ya que este es el dispositivo que empezó a establecer la red originalmente. Es capaz de guardar información sobre la red y de actuar como centro de confianza y repositorio de claves de seguridad. Este dispositivo es del tipo FFD.
- Router ZigBee (ZigBee Router, ZR). Actúa como intermediario en la red intercambiando datos de unos dispositivos a otros. Este dispositivo es del tipo FFD.
- Dispositivo final (ZigBee End Device, ZED). Es capaz de comunicarse sólo con su nodo padre, de esta forma, puede estar dormido la mayor parte del tiempo aumentando así la duración de su batería. Un ZED requiere de muy poca memoria y por ello es más barato que los otros dispositivos. Este dispositivo puede ser del tipo RFD o FFD.

Aplicando estos dispositivos en una aplicación concreta, como puede ser una red domótica, los dispositivos finales (ZED) serán los interruptores ó lámparas, también habrá *routers* ZigBee (ZR) que hagan de intermediarios y toda la red estará gobernada por un coordinador (ZC) que será el centro de toda la red.

3.3.1.3 Topologías de red

La formación de la red es administrada por la capa de red ZigBee.

- En la topología en estrella (Figura 6) todos los dispositivos de la red sólo pueden comunicarse con el coordinador ZigBee (ZC). Un escenario típico en una formación de red en estrella es que un FFD, programado para ser un coordinador ZigBee, se activa y comienza a establecer una red. Lo primero que este coordinador hace es seleccionar un identificador único que no va a ser utilizado por cualquier otra red en su radio de influencia. En otras palabras, se garantiza que el identificador no es utilizado por cualquier otra red cercana.

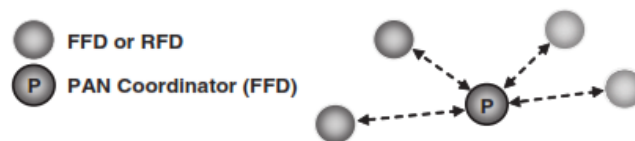


Fig. 6. Topología de red en estrella.

- En una topología punto a punto (véase la Figura 7), cada dispositivo puede comunicarse directamente con cualquier otro dispositivo, si los mismos se colocan lo suficientemente juntos para establecer un enlace de comunicación que se lleva a cabo con éxito. Cualquier dispositivo FFD en una red punto a punto puede desempeñar el papel de coordinador ZigBee. Una manera de decidir qué dispositivo será el coordinador ZigBee es tomar el primer dispositivo FFD que inicia la comunicación como coordinador ZigBee. En una red punto a punto, todos los dispositivos que participan en la transmisión de los mensajes son FFDs, porque los dispositivos RFDs no son capaces de transmitir mensajes. Sin embargo, el dispositivo RFD puede formar parte de la red y comunicarse con un dispositivo en particular (un coordinador o un *router*) en la red. Una red punto a punto puede tomar diferentes formas mediante la definición de restricciones para los dispositivos que pueden comunicarse entre sí. Si no hay ninguna restricción, la red punto a punto se conoce como una topología de malla.

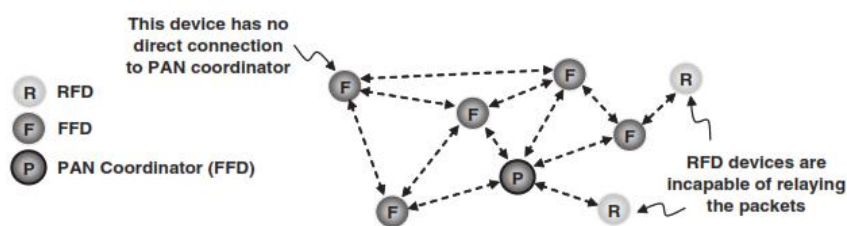


Fig. 7. Topología de red punto a punto.

- Otra red compatible con la topología punto a punto es la topología de árbol (Figura 8). En este caso, un coordinador ZigBee (ZC) establece la red inicial. Los *routers* ZigBee (ZC) forman las ramas y retransmiten los mensajes. Los dispositivos ZigBee finales actúan como las hojas del árbol y no participan en el enrutamiento de mensajes. Los *routers* ZigBee pueden hacer crecer la red más allá de la de la red inicial establecida por el coordinador ZigBee.

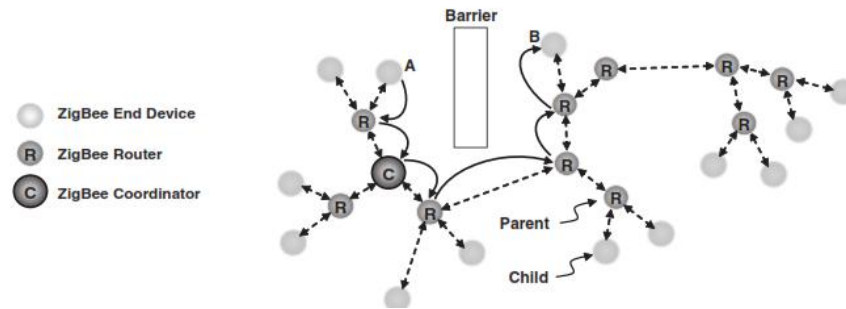


Fig. 8. Topología de red de árbol.

3.3.1.4 Capas de protocolo

Las capas de protocolo de las redes inalámbricas ZigBee se muestran en la Figura 9. Se basan en la Organización Internacional de Normalización (ISO) de interconexión de sistemas abiertos (OSI), modelo de referencia básico. Hay siete capas del modelo ISO / OSI, pero ZigBee sólo implementa las capas que son esenciales para bajo consumo de energía y baja tasa de datos. Las dos capas inferiores (PHY y MAC) están definidas por el estándar IEEE 802.15.4.

En cambio las capas NWK y APL están definidas por el estándar ZigBee. Las características de seguridad se definen en ambas normas. Una red que implementa todas las capas de la figura 9 se considera una red inalámbrica ZigBee.

Cada capa se comunica con las capas adyacentes a través de puntos de acceso al servicio (SAP). Un SAP es un lugar conceptual en el que una capa de protocolo puede solicitar los servicios de otro protocolo de capa. Por ejemplo, en la Figura 9, El PHY de datos de punto de acceso de servicio (PD-SAP) es donde las peticiones de la capa MAC solicita cualquier servicio de datos de la capa física.

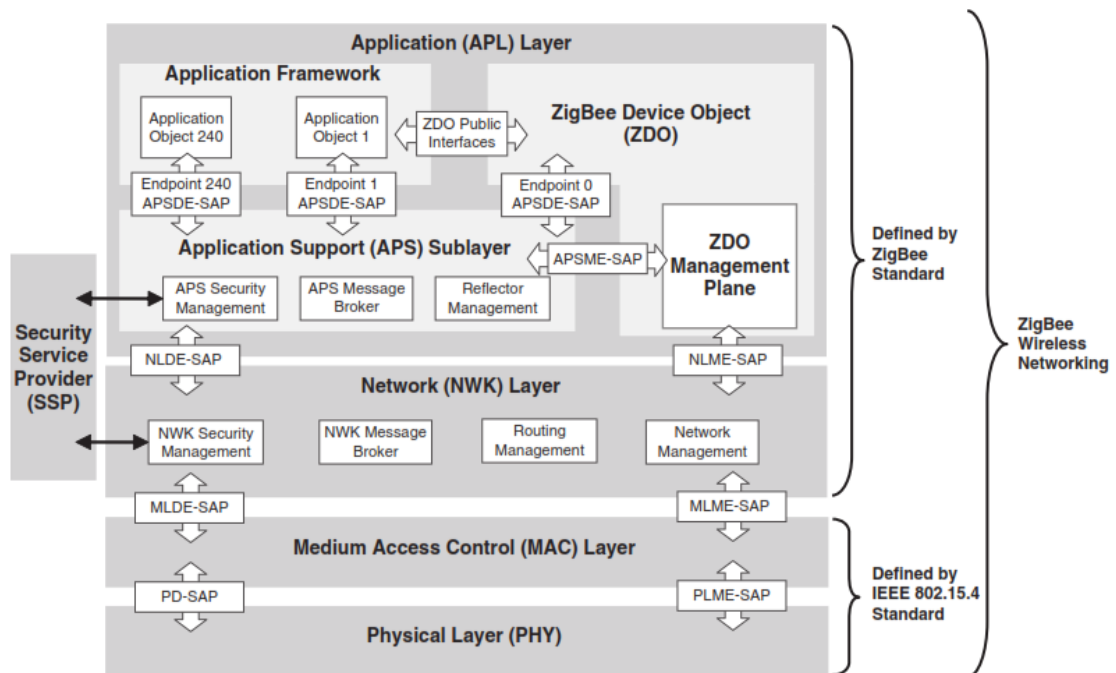


Fig. 9. Capas de protocolo de la redes ZigBee.

3.3.1.5 Aplicaciones

En la mayoría de aplicaciones ZigBee el tiempo total que el dispositivo inalámbrico está desarrollando algún tipo de actividad es muy limitado; el dispositivo gasta la mayoría de su tiempo en un modo de ahorro energético conocido como *sleep mode* (modo en suspensión). Como resultado de esto, los dispositivos ZigBee son capaces de estar operativos durante varios años antes de que sus baterías necesiten ser remplazadas.

Una de las aplicaciones en las que se utiliza ZigBee hoy en día, es en la monitorización de hogares para pacientes que puedan parecer arritmias cardíacas y necesiten que se controle su pulso cardíaco o su presión arterial. El paciente lleva instalado un dispositivo que hace de interfaz con un sensor que recoge información de utilidad para el personal sanitario. Luego, los datos son transmitidos inalámbricamente a un servidor local, como puede ser un PC instalado en el hogar del paciente, donde se lleva a cabo un análisis inicial. Finalmente, la información de mayor relevancia es enviada al personal sanitario vía Internet, para un análisis más exhaustivo.

El ejemplo de una aplicación ZigBee aplicada a los grandes edificios es la de monitorizar su “salud estructural”. En esta aplicación varios sensores inalámbricos ZigBee (como por ejemplo acelerómetros) pueden ser instalados a lo largo de un edificio formando una red inalámbrica capaz de recoger información sobre posibles daños en la estructura del mismo o de evaluar la salud de la estructura.

Después de un terremoto, por ejemplo, un edificio comercial se vería necesitado de una rigurosa inspección antes de reabrirse al público. Los datos recogidos por la red de sensores ayudarían a agilizar y reducir el coste de dicha inspección.

Otras aplicaciones de esta tecnología pueden ser:

- Entretenimiento en el hogar y control: Iluminación inteligente, control de temperaturas, seguridad, películas y música.
- Seguridad en el hogar: Sensores de agua, potencia, humo, fuego, etc.
- Servicios móviles: pagos, vigilancia, seguridad, control de acceso, salud, tele-asistencia, etc.
- Edificios comerciales: seguimiento de energía, aire acondicionado, iluminación, control de acceso...
- Plantas industriales: control de procesos, gestión de materiales, gestión ambiental, gestión de energía, control de dispositivos industriales.

3.3.2 Bluetooth

3.3.2.1 Inicios de la tecnología Bluetooth

Bluetooth [6] empieza a concebirse en Ericsson Mobile Communications AB (Suecia) en 1994 como el efecto colateral de un proyecto sobre enlaces de comunicadores múltiples conectados a la red celular mediante teléfonos; cuatro años más tarde, aparece el grupo de interés en la tecnología Bluetooth SIG (Special Interest Group) en el que aparecían Ericsson, Toshiba, IBM e Intel como empresas promotoras de la tecnología; más tarde se sumaron otros promotores como 3Com, Lucent, Microsoft y Motorola generándose el consorcio Bluetooth; actualmente el Bluetooth SIG cuenta con más de 2000 empresas.

El objetivo de este grupo es, fundamentalmente, promover actividades relativas a mejorar la interoperabilidad de forma que con ello se favorezca el desarrollo del mercado. Para tratar el tema de la interoperabilidad, en términos únicamente de *test bed*, o sea, de métrica/evaluación de características

técnicas, se realizan los tests de productos Bluetooth mediante unos protocolos denominados *Blue Units* que se basan en kits de desarrollo producidos por la firma inglesa Cadence Symbionics Group parte de la firma estadounidense Cadence Design Systems a los que se puede acceder a través de Ericsson Microelectronics AB (Suecia), AU System y Sigma ComTec.

En estos momentos, para que un producto pueda considerarse como Bluetooth tiene que cumplir una serie de protocolos y perfiles; los protocolos describen cómo se realizan las tareas básicas como señalización telefónica, gestión de enlace y lo que se conoce como Service Discovery, es decir, determinación de qué servicios están disponibles desde o través de otros productos Bluetooth; los perfiles describen la forma en que diferentes protocolos y procedimientos básicos funcionan conjuntamente en diferentes productos y aplicaciones Bluetooth: los perfiles están considerados como la primera aproximación en términos de conseguir la interoperabilidad.

Existen grupos de trabajo dentro del SIG Bluetooth que están redactando perfiles para impresión, interfase usuario-equipo y posicionamiento (aplicaciones GPS). Además, como un medio para tratar de acelerar el despegue del mercado, se ha creado recientemente el Bluetooth Measurement Initiative dentro del Bluetooth SIG cuyo objetivo es desarrollar hardware y software para el *testing* de interoperabilidad.

Desde un punto de vista de tecnología de transmisión, Bluetooth está basado en la tecnología clásica del escenario inalámbrico conocida como *spread spectrum* (espectro esparcido), en concreto en *frequency hopping* (salto de frecuencia): estos sistemas de *frequency hopping* dividen la banda de frecuencia en varios canales de salto (*hopping*); en el transcurso de la conexión se produce una transición brusca (salto o *hopping*) de un canal a otro de forma pseudo aleatoria.

Desde un punto de vista de arquitectura, Bluetooth se basa en el concepto de *picored*, un concepto genérico en las redes de área personal que se refiere a la capacidad de varios equipos para configurarse como una red; de una forma más estricta, la *picored* se puede definir como la red de corto alcance formada por dos o más unidades o equipos que comparten un canal, es decir, que funcionan de forma síncrona y siguiendo a la misma frecuencia de *hopping*.

La *picored* se diferencia de otras redes similares de su entorno mediante la secuencia de frecuencia de *hopping*. Las *picorredes* se pueden enlazar de forma *ad-hoc* generando lo que se conoce como red de dispersión o *scatternet*: estas *scatternets* permiten que se pueda producir la comunicación entre configuraciones flexibles de forma continua; estas redes pueden actuar también como enlace inalámbrico a redes de datos ya existentes.

El chip Bluetooth está formado por un *transceiver* de radio-frecuencia, una unidad de control de enlace banda-base conjuntamente con el software de gestión y un subsistema de antena; a los equipos que incluyen este chip y verifican las especificaciones Bluetooth se les conoce, en la literatura internacional, como productos Bluetooth *enabled*.

3.3.2.2 Descripción general

Bluetooth es un enlace de radio de corto alcance que pretende remplazar conexiones por cable(s) de dispositivos electrónicos portátiles o fijos. Sus principales características son; baja complejidad, bajo consumo de energía, bajos costos además de ser un dispositivo robusto.

Bluetooth opera en la banda libre ISM de los 2.4 GHz. En la mayoría de los países alrededor del mundo, el rango de dichas frecuencias va de los 2400 MHz a los 2483.5 MHz. Sin embargo, en algunos países, tienen limitaciones nacionales en ese rango de frecuencias. Para cumplir con dichas limitaciones internacionales, se han diseñado algoritmos especiales de *frequency-hopping* para dichos países.

Lugar	Rango de Frecuencias (GHz)	Canales de RF
USA, Europa, mayoría de los países.	2.400 – 2.4835	$f = 2402 + k \text{ MHz}, k = 0, \dots, 78$
Francia	2.4465 – 2.4835	$f = 2454 + k \text{ MHz}, k = 0, \dots, 22$

Fig. 10. Frecuencia de operación.

Para evitar la interferencia y la pérdida de información se utiliza un transmisor-receptor de *frequency hop* (salto de frecuencia). Para minimizar la complejidad del transceptor se utiliza una modulación binaria de FM. La tasa de transferencia es de 1 Msymbol/s. Se aplica un canal ranurado con una duración estándar de 625 μ s por cada *slot* (ranura) de tiempo.

Para emular una transmisión *full duplex*, se utiliza una trama de TDD (time division duplex). En el canal, la información se intercambia por medio de paquetes. Bluetooth puede soportar un canal de datos asíncronos, hasta tres canales de voz síncronos simultáneamente, o un canal capaz de manejar simultáneamente datos asíncronos y voz síncrona. Cada canal de voz soporta 64 kb/s de datos síncronos (voz) en cada dirección. El canal asíncrono puede soportar un máximo de 723.2 kb/s asimétricos o 433.9 kb/s.

El sistema Bluetooth consiste de una unidad de radio, una unidad de control de link y una unidad de soporte para el manejo de las funciones y de la terminal de servicio de la interfase (Figura 11). Esta cláusula describe las especificaciones del controlador de enlace Bluetooth, el cual transporta los protocolos de banda base y otras rutinas de bajo nivel.

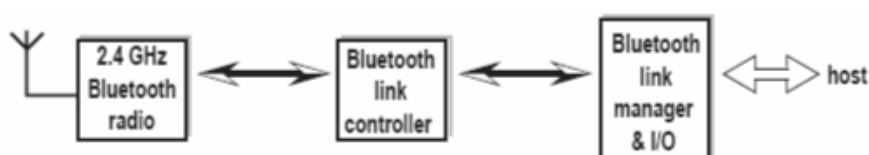


Fig. 11. Distintos bloques funcionales para un sistema Bluetooth.

Los sistemas Bluetooth proporcionan conexión punto a punto (solo se involucran dos unidades Bluetooth), o una conexión punto a multipunto (ver figura 12). En una conexión punto a multipunto, el canal se comparte entre varias unidades Bluetooth. Dos o más unidades que comparten el mismo canal forman una *picored*.

Un solo dispositivo Bluetooth trabaja como maestro de la *picored*, mientras que el(los) otro(s) trabajan como esclavos. Hasta siete esclavos pueden estar activos en una *picored*. Además, muchos más esclavos pueden estar conectados al dispositivo maestro en un estado inactivo o latente.

Dichos esclavos latentes no se pueden estar activos en el canal, pero se mantienen sincronizados al maestro. Tanto para los esclavos activos como para los latentes, el canal de acceso es controlado por el maestro.

Múltiples *picoredes* con áreas de cobertura traslapada forman una red dispersa o una *scatternet*. Cada *picored* puede tener solamente un maestro. Sin embargo, los esclavos pueden participar en

diferentes *picoredes* bajo una base de time-division multiplex. Además, un maestro en una *picored* puede ser esclavo en otra *picored*. Las *picoredes* no deben de estar sincronizadas en frecuencia. Cada *picored* tiene su propio canal de salto.

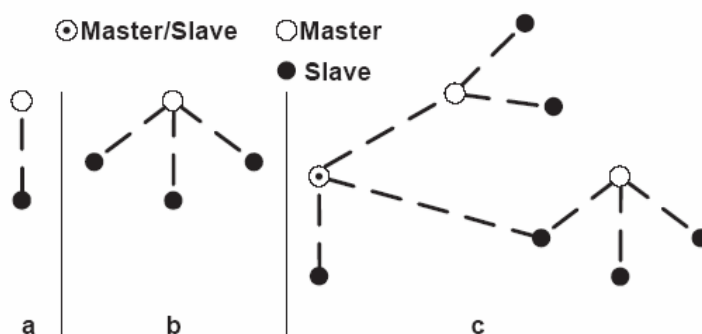


Fig. 12. Varias formaciones de picoredes: (a) Operación con un solo esclavo; (b) Operación multiesclavo; (c) Operación tipo *scatternet*.

3.3.2.3 Características del transmisor

Los requerimientos en esta cláusula especifican los niveles de energía en el conector de la antena del equipo. Si el equipo no tiene un conector, se asume una antena de referencia con una ganancia de 0 dB.

Debido a que es complicado obtener una medida precisa en las mediciones en medidas de radiación, se prefiere que los sistemas con una antena integrada tengan un conector temporal de antena durante las pruebas.

Los equipos se dividen en tres clases de grupos dependiendo su nivel de potencia, dichos grupos se pueden apreciar en la Figura 13.

Power class	Maximum output power (P_{\max})	Nominal output power	Minimum output power ^a	Power control
1	100 mW (20 dBm)	N/A	1 mW (0 dBm)	$P_{\min} < +4$ dBm to P_{\max} Optional: P_{\min}^b to P_{\max}
2	2.5 mW (4 dBm)	1 mW (0 dBm)	0.25 mW (-6 dBm)	Optional: P_{\min}^b to P_{\max}
3	1 mW (0 dBm)	N/A	N/A	Optional: P_{\min}^b to P_{\max}

Fig. 13. Tipos de energía. ^a Energía mínima de salida en el ajuste máximo de energía. ^b Límite mínimo sugerido de energía $P_{\min} < -30$ dBm.

Se requiere de control de energía para equipos que se encuentran en la clase 1. El control de energía se utiliza para limitar la transmisión de energía sobre los 0 dBm. Los controles de energía bajo los 0 dBm son opcionales y se pueden utilizar para optimizar el consumo de energía y reducir el total de interferencia. Los niveles de energía deben formar una secuencia monótona con un nivel máximo de 8 dB y un mínimo de 2 dB. Los equipos que pertenecen a la clase 1 que transmiten un máximo de energía de +20 dB deben de ser capaces de mantener la energía de transmisión por debajo de los 4 dBm.

Equipos con capacidades de control de energía optimizan la salida de energía en un link con comandos LMP. Esto se hace al medir el RSSI (receiver signal strength indication) y reportar si se debe incrementar o disminuir el nivel de energía.

3.3.2.4 Características de recepción

Para medir el desempeño de la tasa de errores de bit, el equipo debe tener algún medio de retroalimentación. El equipo manda la información decodificada de regreso. El nivel de referencia de sensibilidad debe estar referido a -70 dBm.

Los niveles actuales de sensibilidad se define como los niveles de entrada para los cuales el BER (bit error rate) se consideran de un 0.1%. Los requerimientos de un receptor Bluetooth es un nivel de sensibilidad de -70 dBm o mejor. El receptor debe de tener un nivel sensibilidad de -70 dBm con cualquier transmisor Bluetooth.

El desempeño con interferencia co-canal y adyacente a 1 MHz y un 2 MHz y se mide con la señal deseada a 10 dB sobre el nivel de referencia. En todas las demás frecuencias, la señal deseada debe ser de 3 dB sobre el nivel de sensibilidad de referencia. El BER debe de ser = 0.1 %.

3.3.2.5 Capas de protocolo

Hay dos formas de ver cualquier diseño de sistemas de comunicación; por su arquitectura y su funcionalidad. Un acercamiento hacia la arquitectura enfatiza las divisiones lógicas de un sistema y como son compatibles. El acercamiento hacia la funcionalidad hace énfasis en los componentes actuales y sus interconexiones.

A continuación se presenta una vista de la arquitectura de una WPAN (Figura 13). Se enfatiza la tradicional separación de larga escala del sistema en dos partes; physical layer (PHY) del IEEE 802.15.1 y la subcapa MAC (medium access control) del DLL (data link layer).

En la siguiente figura se muestra la pila del protocolo en la séptima capa del modelo del OSI en la tecnología inalámbrica de Bluetooth y su relación con este estándar. Como se puede observar en la siguiente figura las subcapas LLC (logical link control) y el MAC juntas abarcan las funciones deseadas para el DLL del modelo de OSI.

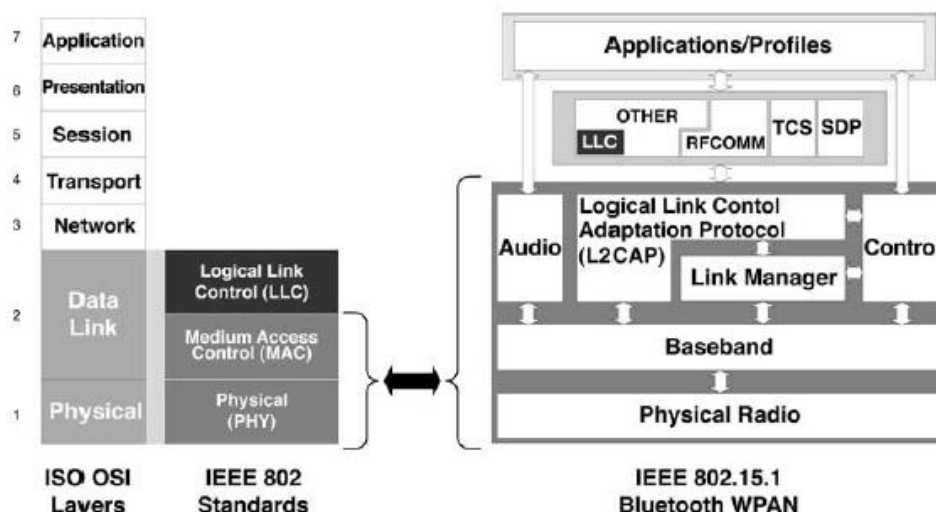


Fig. 14. Capas del protocolo Bluetooth.

3.3.3 Wi-Fi

3.3.3.1 Introducción a Wi-Fi (802.11)

La especificación IEEE 802.11 (ISO/IEC 8802-11) es un estándar internacional [7] que define las características de una red de área local inalámbrica (WLAN). Wi-Fi (que significa "Fidelidad inalámbrica", a veces incorrectamente abreviado WiFi) es el nombre de la certificación otorgada por la Wi-Fi Alliance, anteriormente WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance), grupo que garantiza la compatibilidad entre dispositivos que utilizan el estándar 802.11. Por el uso indebido de los términos (y por razones de marketing) el nombre del estándar se confunde con el nombre de la certificación. Una red Wi-Fi es en realidad una red que cumple con el estándar 802.11.

Con Wi-Fi se pueden crear redes de área local inalámbricas de alta velocidad siempre y cuando el equipo que se vaya a conectar no esté muy alejado del punto de acceso. En la práctica, Wi-Fi admite ordenadores portátiles, equipos de escritorio, asistentes digitales personales (PDA) o cualquier otro tipo de dispositivo de alta velocidad con propiedades de conexión también de alta velocidad (11 Mbps o superior) dentro de un radio de varias docenas de metros en ambientes cerrados (de 20 a 50 metros en general) o dentro de un radio de cientos de metros al aire libre.

Los proveedores de Wi-Fi están comenzando a cubrir áreas con una gran concentración de usuarios (como estaciones de trenes, aeropuertos y hoteles) con redes inalámbricas. Estas áreas se denominan "zonas locales de cobertura".

3.3.3.2 Capas de protocolo

El estándar 802.11 establece los niveles inferiores del modelo OSI para las conexiones inalámbricas que utilizan ondas electromagnéticas, por ejemplo:

- La capa física (a veces abreviada capa "PHY") ofrece tres tipos de codificación de información.
- La capa de enlace de datos compuesta por dos subcapas: control de enlace lógico (LLC) y control de acceso al medio (MAC).

La capa física define la modulación de las ondas de radio y las características de señalización para la transmisión de datos mientras que la capa de enlace de datos define la interfaz entre el bus del equipo y la capa física, en particular un método de acceso parecido al utilizado en el estándar Ethernet, y las reglas para la comunicación entre las estaciones de la red. En realidad, el estándar 802.11 tiene tres capas físicas que establecen modos de transmisión alternativos:

Capa de enlace de datos (MAC)	802.2		
	802.11		
Capa física (PHY)	DSSS	FHSS	Infrarrojo

Fig. 15. Capas física y de enlace de datos del estándar 802.11.

Cualquier protocolo de nivel superior puede utilizarse en una red inalámbrica Wi-Fi de la misma manera que puede utilizarse en una red Ethernet.

3.3.3.3 Los distintos estándares Wi-Fi

El estándar 802.11 en realidad es el primer estándar y permite un ancho de banda de 1 a 2 Mbps. El estándar original se ha modificado para optimizar el ancho de banda (incluidos los estándares 802.11a, 802.11b y 802.11g, denominados estándares físicos 802.11) o para especificar componentes de mejor manera con el fin de garantizar mayor seguridad o compatibilidad.

Existen diferentes estándares cada uno con diferentes características:

- 802.11a (Wi-Fi 5). El estándar 802.11 (llamado Wi-Fi 5) admite un ancho de banda superior (el rendimiento total máximo es de 54 Mbps aunque en la práctica es de 30 Mbps). El estándar 802.11a provee ocho canales de radio en la banda de frecuencia de 5 GHz.
- 802.11b (Wi-Fi). El estándar 802.11 es el más utilizado actualmente. Ofrece un rendimiento total máximo de 11 Mbps (6 Mbps en la práctica) y tiene un alcance de hasta 300 metros en un espacio abierto. Utiliza el rango de frecuencia de 2,4 GHz con tres canales de radio disponibles.
- 802.11c (Combinación del 802.11 y el 802.1d). El estándar combinado 802.11c no ofrece ningún interés para el público general. Es solamente una versión modificada del estándar 802.1d que permite combinar el 802.1d con dispositivos compatibles 802.11 (en el nivel de enlace de datos).
- 802.11d (Internacionalización). El estándar 802.11d es un complemento del estándar 802.11 que está pensado para permitir el uso internacional de las redes 802.11 locales. Permite que distintos dispositivos intercambien información en rangos de frecuencia según lo que se permite en el país de origen del dispositivo.
- 802.11e (Mejora de la calidad del servicio). El estándar 802.11e está destinado a mejorar la calidad del servicio en el nivel de la capa de enlace de datos. El objetivo del estándar es definir los requisitos de diferentes paquetes en cuanto al ancho de banda y al retardo de transmisión para permitir mejores transmisiones de audio y vídeo.
- 802.11f (Itinerancia). El 802.11f es una recomendación para proveedores de puntos de acceso que permite que los productos sean más compatibles. Utiliza el protocolo IAPP que le permite a un usuario itinerante cambiarse claramente de un punto de acceso a otro mientras está en movimiento sin importar qué marcas de puntos de acceso se usan en la infraestructura de la red. También se conoce a esta propiedad simplemente como itinerancia.
- 802.11g. El estándar 802.11g ofrece un ancho de banda elevado (con un rendimiento total máximo de 54 Mbps pero de 30 Mbps en la práctica) en el rango de frecuencia de 2,4 GHz. El estándar 802.11g es compatible con el estándar anterior, el 802.11b, lo que significa que los dispositivos que admiten el estándar 802.11g también pueden funcionar con el 802.11b.
- 802.11h. El estándar 802.11h tiene por objeto unir el estándar 802.11 con el estándar europeo (HiperLAN 2, de ahí la h de 802.11h) y cumplir con las regulaciones europeas relacionadas con el uso de las frecuencias y el rendimiento energético.
- 802.11i. El estándar 802.11i está destinado a mejorar la seguridad en la transferencia de datos (al administrar y distribuir claves, y al implementar el cifrado y la autenticación). Este estándar se basa en el AES (estándar de cifrado avanzado) y puede cifrar transmisiones que se ejecutan en las tecnologías 802.11a, 802.11b y 802.11g.
- 802.11r. El estándar 802.11r se elaboró para que pueda usar señales infrarrojas. Este estándar se ha vuelto tecnológicamente obsoleto.

- 802.11j. El estándar 802.11j es para la regulación japonesa lo que el 802.11h es para la regulación europea.

También es importante mencionar la existencia de un estándar llamado "802.11b+". Éste es un estándar patentado que contiene mejoras con respecto al flujo de datos. Por otro lado, este estándar tiene algunas carencias de interoperabilidad debido a que no es un estándar IEEE.

3.3.3.4 Rango y flujo de datos

Los estándares 802.11a, 802.11b y 802.11g, llamados "estándares físicos", son modificaciones del estándar 802.11 y operan de modos diferentes, lo que les permite alcanzar distintas velocidades en la transferencia de datos según sus rangos.

Estándar	Frecuencia	Velocidad	Rango
WiFi A (802.11a)	5 GHz	54 Mbit/s	10 m
WiFi B (802.11b)	2,4 GHz	11 Mbit/s	100 m
WiFi G (802.11g)	2,4 GHz	54 Mbit/s	100 m

Fig. 16. Frecuencia, velocidad y rango de los estándares 802.11a, 802.11b y 802.11g.

3.3.3.4.1 802.11a

El estándar 802.11 tiene en teoría un flujo de datos máximo de 54 Mbps, cinco veces el del 802.11b y sólo a un rango de treinta metros aproximadamente. El estándar 802.11a se basa en la tecnología llamada OFDM (multiplexación por división de frecuencias ortogonales). Transmite en un rango de frecuencia de 5 GHz y utiliza 8 canales no superpuestos.

Es por esto que los dispositivos 802.11a son incompatibles con los dispositivos 802.11b. Sin embargo, existen dispositivos que incorporan ambos chips, los 802.11a y los 802.11b y se llaman dispositivos de "banda dual".

Velocidad hipotética (en ambientes cerrados)	Rango
54 Mbit/s	10 m
48 Mbit/s	17 m
36 Mbit/s	25 m
24 Mbit/s	30 m
12 Mbit/s	50 m
6 Mbit/s	70 m

Fig. 17. Velocidades y rangos del estándar 802.11a.

3.3.3.4.2 802.11b

El estándar 802.11b permite un máximo de transferencia de datos de 11 Mbps en un rango de 100 metros aproximadamente en ambientes cerrados y de más de 200 metros al aire libre (o incluso más que eso con el uso de antenas direccionales).

Velocidad hipotética	Rango (en ambientes cerrados)	Rango (al aire libre)
11 Mbit/s	50 m	200 m
5,5 Mbit/s	75 m	300 m
2 Mbit/s	100 m	400 m
1 Mbit/s	150 m	500 m

Fig. 18. Velocidades y rangos del estándar 802.11b.

3.3.3.4.3 802.11g

El estándar 802.11g permite un máximo de transferencia de datos de 54 Mbps en rangos comparables a los del estándar 802.11b. Además, y debido a que el estándar 802.11g utiliza el rango de frecuencia de 2.4 GHz con codificación OFDM, es compatible con los dispositivos 802.11b con excepción de algunos dispositivos más antiguos.

Velocidad hipotética	Rango (en ambientes cerrados)	Rango (al aire libre)
54 Mbit/s	27 m	75 m
48 Mbit/s	29 m	100 m
36 Mbit/s	30 m	120 m
24 Mbit/s	42 m	140 m
18 Mbit/s	55 m	180 m
12 Mbit/s	64 m	250 m
9 Mbit/s	75 m	350 m
6 Mbit/s	90 m	400 m

Fig. 19. Velocidades y rangos del estándar 802.11g.

3.3.3.5 Modos de funcionamiento

Existen varias clases de hardware que se pueden utilizar para implementar una red inalámbrica WiFi:

- Los adaptadores inalámbricos o controladores de la interfaz de red (en inglés *wireless adaptaters* o *network interface controller*, abreviado NIC) son tarjetas de red que cumplen con el estándar 802.11 que les permiten a un equipo conectarse a una red inalámbrica. Los adaptadores inalámbricos están disponibles en diversos formatos, como tarjetas PCI, tarjetas PCMCIA, adaptadores USB y tarjetas Compact Flash. Una estación es cualquier dispositivo que tenga este tipo de tarjeta.
- Los puntos de acceso (abreviado PA y a veces denominados *zonas locales de cobertura*) pueden permitirles a las estaciones equipadas con Wi-Fi cercanas acceder a una red conectada a la que el punto de acceso se conecta directamente.

El estándar 802.11 define dos modos operativos:

- El modo de infraestructura en el que los clientes de tecnología inalámbrica se conectan a un punto de acceso. Éste es por lo general el modo predeterminado para las tarjetas 802.11b.
- El modo ad-hoc en el que los clientes se conectan entre sí sin ningún punto de acceso.

3.3.3.5.1 Modo de infraestructura

En el modo de infraestructura, cada estación informática (abreviado EST) se conecta a un punto de acceso a través de un enlace inalámbrico. La configuración formada por el punto de acceso y las estaciones ubicadas dentro del área de cobertura se llama conjunto de servicio básico o BSS. Estos forman una célula. Cada BSS se identifica a través de un BSSID (identificador de BSS) que es un identificador de 6 bytes (48 bits). En el modo infraestructura el BSSID corresponde al punto de acceso de la dirección MAC.

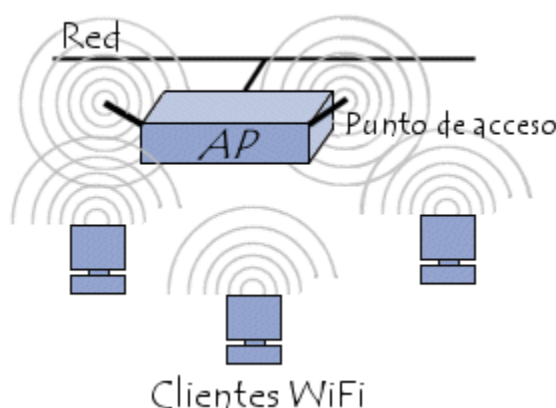


Fig. 20. Topología de una red en modo infraestructura.

Es posible vincular varios puntos de acceso juntos (o con más exactitud, varios BSS) con una conexión llamada *sistema de distribución* (o SD) para formar un *conjunto de servicio extendido* o ESS. El sistema de distribución también puede ser una red conectada, un cable entre dos puntos de acceso o incluso una red inalámbrica.

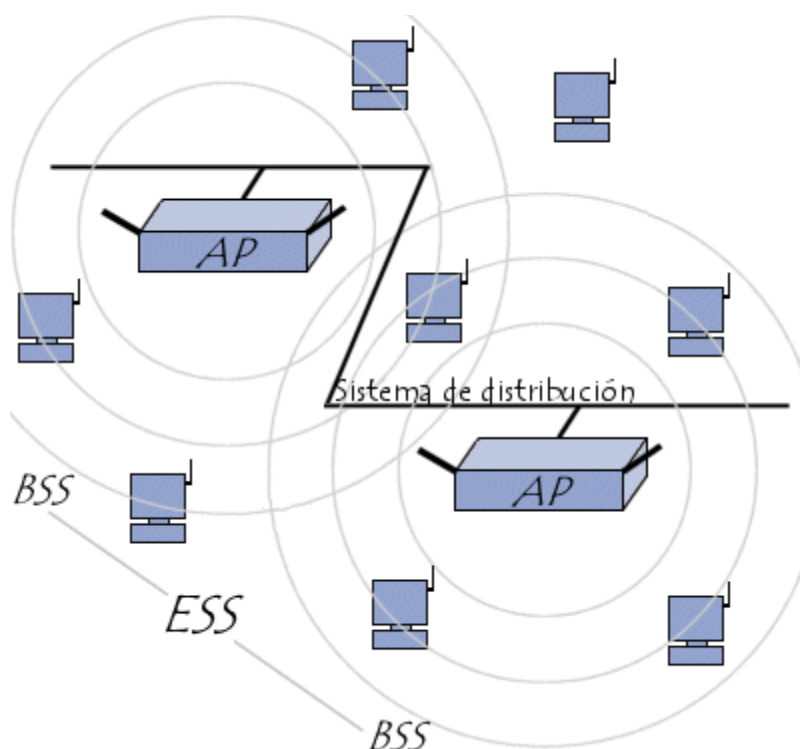


Fig. 21. Topología de una red en modo infraestructura extendida.

Un ESS se identifica a través de un ESSID (identificador del conjunto de servicio extendido), que es un identificador de 32 caracteres en formato ASCII que actúa como su nombre en la red. El ESSID, a menudo abreviado SSID, muestra el nombre de la red y de alguna manera representa una medida de seguridad de primer nivel ya que una estación debe saber el SSID para conectarse a la red extendida.

Cuando un usuario itinerante va desde un BSS a otro mientras se mueve dentro del ESS, el adaptador de la red inalámbrica de su equipo puede cambiarse de punto de acceso, según la calidad de la señal que reciba desde distintos puntos de acceso. Los puntos de acceso se comunican entre sí a través de un sistema de distribución con el fin de intercambiar información sobre las estaciones y, si es necesario, para transmitir datos desde estaciones móviles. Esta característica que permite a las estaciones moverse "de forma transparente" de un punto de acceso al otro se denomina itinerancia.

3.3.3.5.2 Modo ad-hoc

En el modo ad hoc los equipos cliente inalámbrico se conectan entre sí para formar una red punto a punto, es decir, una red en la que cada equipo actúa como cliente y como punto de acceso simultáneamente.

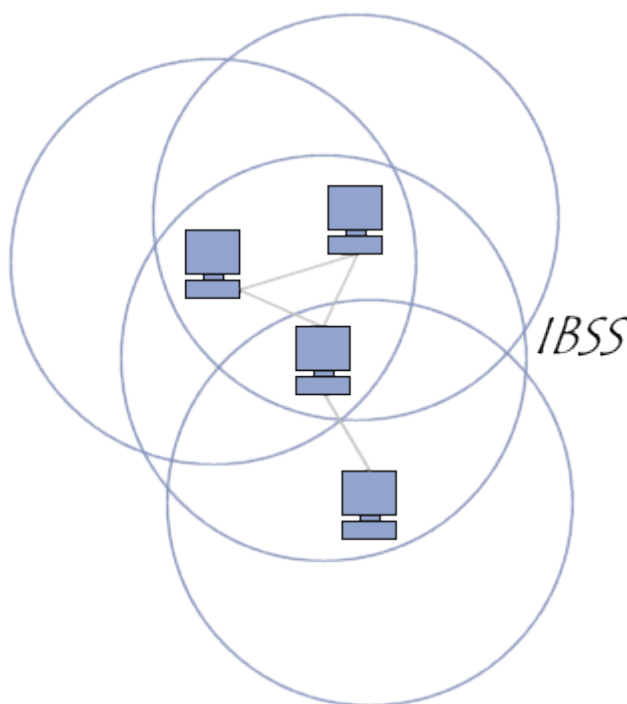


Fig. 22. Topología de una red en modo ad-hoc.

La configuración que forman las estaciones se llama conjunto de servicio básico independiente o IBSS.

Un IBSS es una red inalámbrica que tiene al menos dos estaciones y no usa ningún punto de acceso. Por eso, el IBSS crea una red temporal que le permite a la gente que esté en la misma sala intercambiar datos. Se identifica a través de un SSID de la misma manera en que lo hace un ESS en el modo infraestructura.

En una red ad hoc, el rango del *BSS independiente* está determinado por el rango de cada estación. Esto significa que si dos estaciones de la red están fuera del rango de la otra, no podrán comunicarse, ni siquiera cuando puedan "ver" otras estaciones. A diferencia del modo infraestructura, el modo ad hoc no tiene un sistema de distribución que pueda enviar tramas de datos desde una estación a la otra. Entonces, por definición, un IBSS es una red inalámbrica restringida.

3.4 Métodos empíricos de predicción de propagación

Los métodos de predicción de atenuación [8] expuestos hasta ahora requieren el conocimiento del perfil del terreno entre el transmisor y el receptor, enlaces punto a punto.

Cuando se trata de comunicaciones zonales, existe una gran variedad de trayectos de propagación. El estudio de la propagación suele realizarse analizando perfiles a lo largo de radiales trazados desde el transmisor. Es habitual trabajar como mínimo con 12 radiales.

Cuando el trayecto se da sobre terrenos con grandes irregularidades o sobre suelo de tipo urbano se una situación similar.

Para estos escenarios se han desarrollado métodos empíricos de estimación de la pérdida básica de propagación y de la intensidad de campo.

Estos métodos se basan en mediciones exhaustivas y una posterior correlación de las medidas con características descriptivas del medio de propagación.

Los métodos empíricos proporcionan una estimación rápida de la pérdida básica o de la intensidad de campo. Son métodos de utilización sencilla y rápida pero su exactitud es mediocre. La media cuadrática del error suele estar entre 10 y 14 dB.

Los métodos más usados son:

- Rec. 370 (CCIR) para el medio rural
- Método Okumura-Hata para el medio urbano
- Método COST 231 para el medio urbano

3.4.1 Método Rec. 370 (CCIR) para el medio rural

Desarrollado a partir de múltiples mediciones sobre trayectos terrestres para climas templados (EU y USA) y sobre trayectos marítimos (Mediterráneo, cálido y Mar del Norte frío).

Las mediciones se redujeron a curvas de propagación normalizadas.

Las curvas están destinadas a la planificación de los servicios de radio y TV, gozan de consenso internacional.

Las curvas proporcionan para las bandas VHF (I a III) y UHF (IV y V) y para una $P_{ra}=1$ kW, los valores de la intensidad de campo (dBu), excedidos en el 50% de emplazamiento y diferentes porcentajes de tiempo.

Se facilitan curvas para tierra y para mar (frío/caliente) con altura de la antena receptora= 10 m.

Las curvas incorporan como parámetro la “altura efectiva” de la antena transmisora que se define como la altura del centro de radiación sobre el nivel del terreno entre 3 y 15 Km, desde el transmisor hacia el receptor.

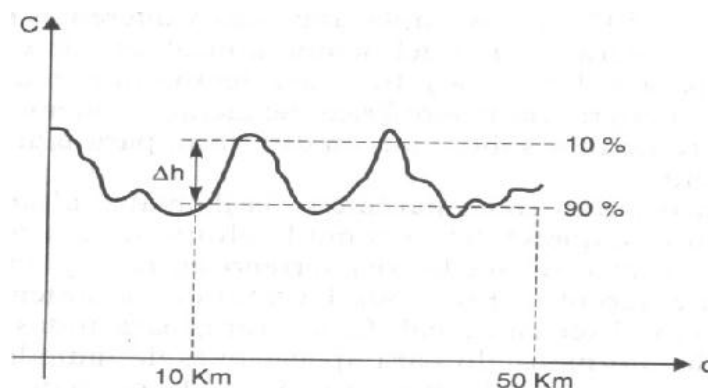


Fig. 23. Curva que representa la “altura efectiva” de la antena transmisora.

$$h_{ef} = h_t + c(0) - h_m \quad (3.44)$$

El otro parámetro de caracterización aproximada del terreno es el de “ondulación del terreno” (Δh).

Se define Δh como la diferencia entre alturas superadas por el 90 % y 10 % del trayecto, entre las distancias d_1 y d_2 desde el transmisor hacia el receptor.

Para aplicaciones de radiodifusión se toma:

$$d_1 = 10 \text{ km.}$$

$$d_2 = 50 \text{ km.}$$

el valor de Δh estándar es 50 m.

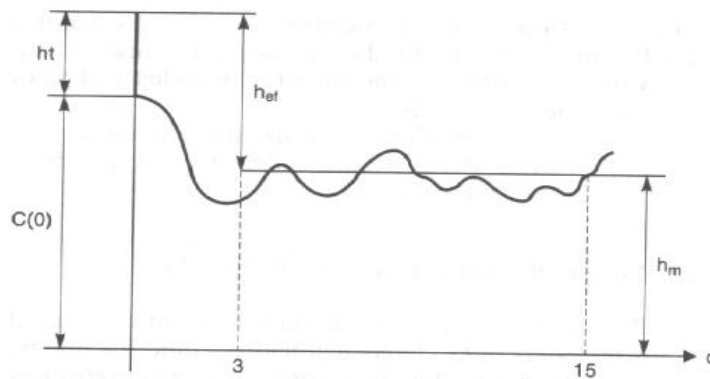


Fig. 24. Curva que representa la “ondulación del terreno”.

En la siguiente figura se representa la familia de curvas para tierra, banda I-II-III, 50 % emplazamiento, 50 % de tiempo.

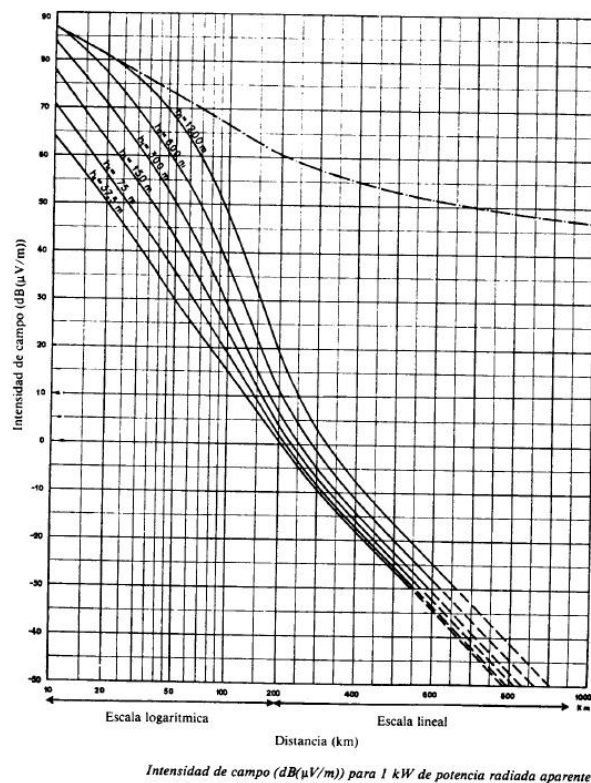


Fig. 25. Familia de curvas para tierra, banda I-II-III, 50 % emplazamiento, 50 % de tiempo.

En la siguiente figura se representan curvas similares para el 10 % del tiempo:

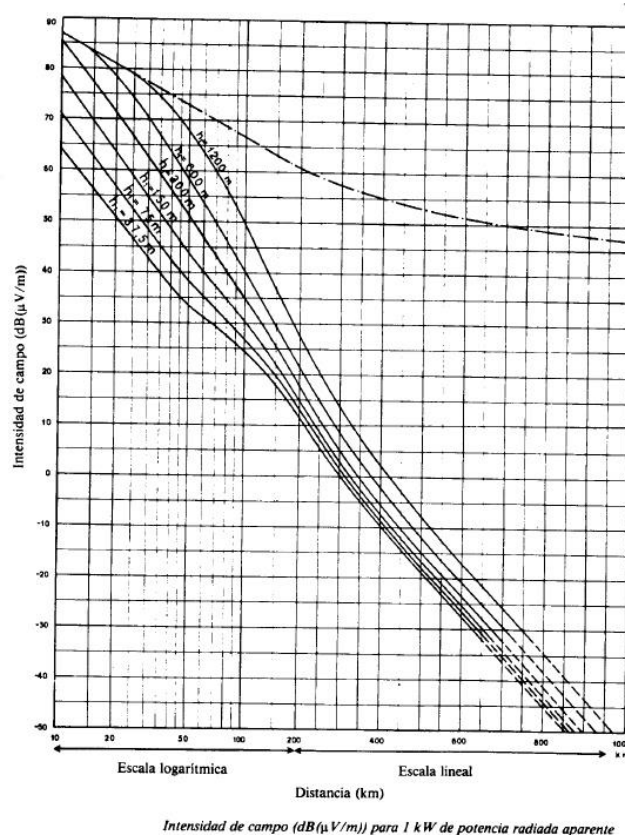


Fig. 26. Familia de curvas para tierra, banda I-II-III, 50 % emplazamiento, 10 % de tiempo.

En la figura siguiente se representa la familia de curvas para: tierra, bandas IV-V 50 % del tiempo:

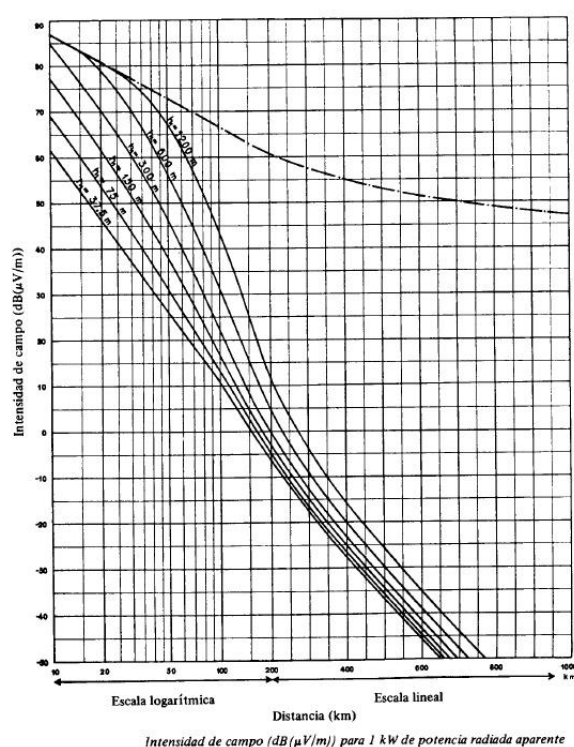


Fig. 27. Familia de curvas para tierra, bandas IV-V, 50 % emplazamiento, 50 % de tiempo.

Para situaciones diferentes a las normalizadas hay una serie de correcciones:

$$E = E_c + (P) - (\Delta h) - (h_r) + (L) + (D) \quad (3.45)$$

Donde:

- E_c = Valor leído en curvas.
- (P) = PRA del transmisor en dB/kW.
- (Δh) = Factor de corrección por ondulación del terreno.

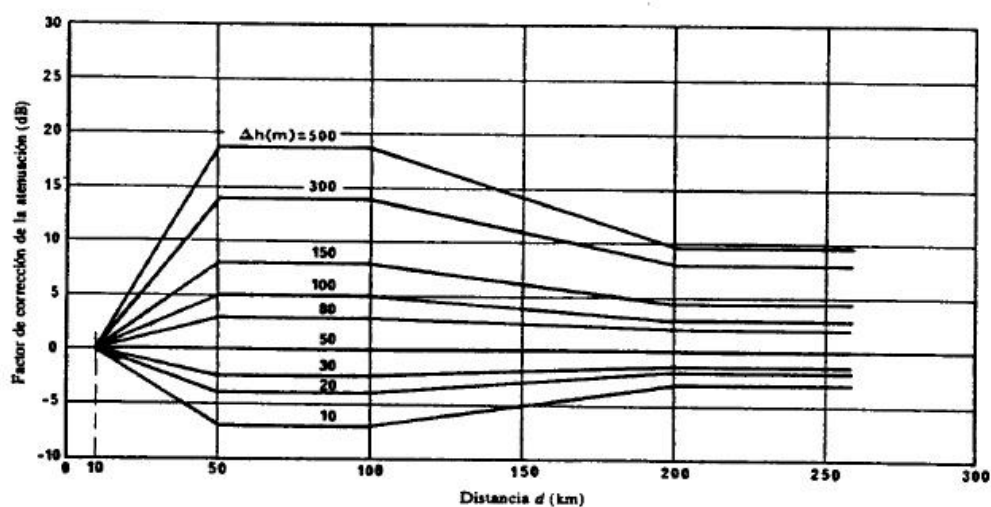


Fig. 28. Factor de corrección de la atenuación en función de la distancia d (km) y Δh . Frecuencia 80 a 250 MHz (Bandas II y III).

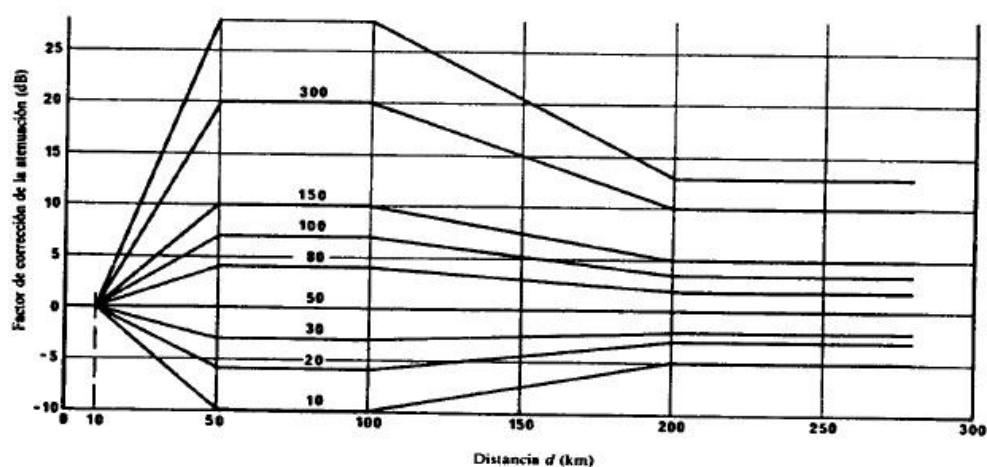


Fig. 29. Factor de corrección de la atenuación en función de la distancia d (km) y Δh . Frecuencia 450 a 1000 MHz (Bandas IV y V).

- (h_r) = Corrección por altura receptora 3 m. En vez de 10 m.

$$\text{Rec. 370 CCIR} \left\{ \begin{array}{l} \text{Banda I - II} \rightarrow (h_r) = 9 \text{ dB} \\ \text{Banda III} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (h_r) = 7 \text{ dB terreno llano} \\ (h_r) = 11 \text{ dB terreno rugoso} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

- (L) = Corrección por porcentaje de ubicaciones. Se aplica cuando se desean valores de campo superados en porcentajes de ubicaciones cualesquiera. Para ello se supone una variación gaussiana del campo con los emplazamientos con una desviación típica.

$$\text{Banda I-II-III: } \sigma_L = 8.3 \text{ dB.} \quad (3.46)$$

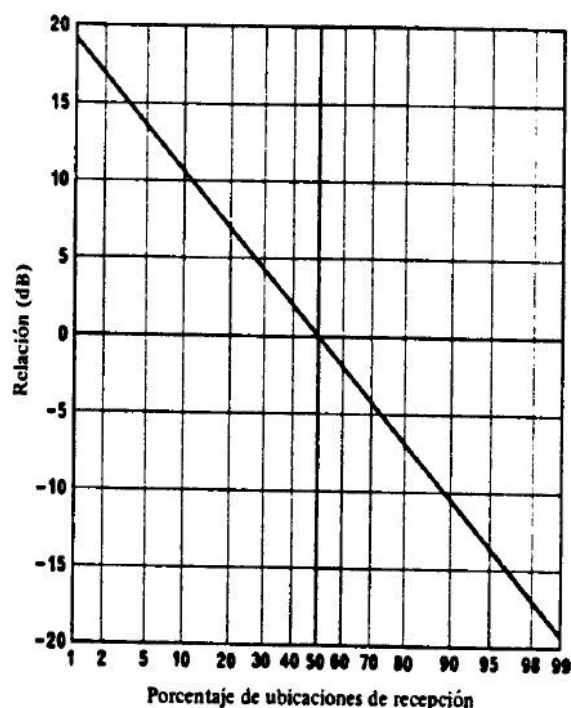


Fig. 30. Relación (dB) entre la intensidad de campo para un porcentaje cualquiera de ubicaciones de recepción y la intensidad de campo para el 50 % de ubicaciones de recepción. Frecuencias: 30 a 250 MHz (Bandas I, II y III).

$$\text{Banda IV-V: } \rightarrow \sigma_L = 6 + 11,95(\Delta h \cdot f)^{\frac{1}{2}} - 1,89(\Delta h \cdot f) \quad (3.47)$$

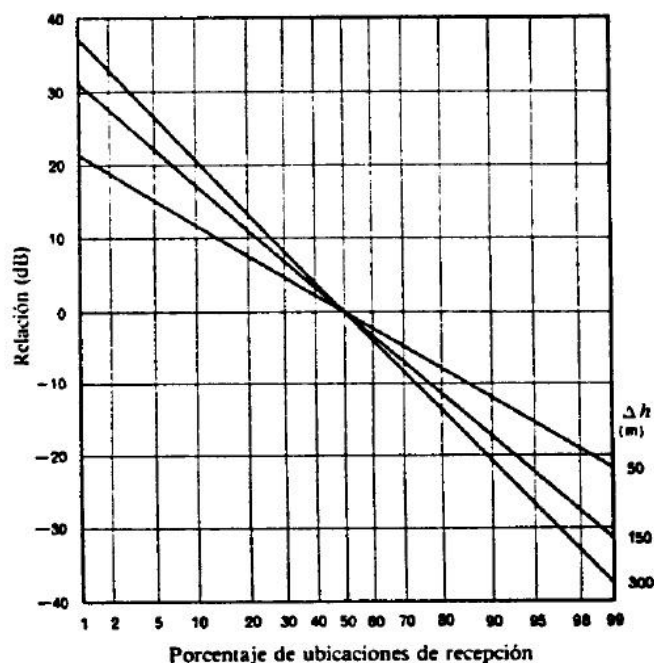


Fig. 31. Relación (dB) entre la intensidad de campo para un porcentaje cualquiera de ubicaciones de recepción y la intensidad de campo para el 50 % de ubicaciones de recepción. Frecuencias: 450 a 1000 MHz (Bandas IV y V).

- (D): Corrección por despejamiento del receptor. Cuando se desea una estimación más precisa del campo en el entorno del receptor. θ es el ángulo de horizonte desde el receptor, dentro de un intervalo de 16 km. en dirección al transmisor. El ángulo es negativo cuando el horizonte está por encima del receptor y positivo cuando está por debajo.

Si $z(x_k)$ y x_k son la ordenada y abcisa respectivamente del punto dominante en el intervalo de 16 km:

$$\theta = \frac{0.18}{\pi} \left[\frac{c(d)+10-z(x_k)}{d-x_k} - \frac{d}{2 \cdot k \cdot R_0} \cdot 10^3 \right] \quad (3.48)$$

Donde:

- θ en grados.
- $c(d), z(x_k)$ en metros.
- d, x_k, R_0 en km.

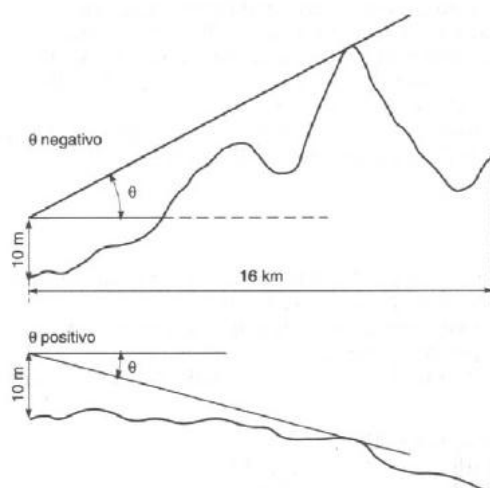


Fig. 32. Corrección por despejamiento en el receptor.

3.4.2 Método Okumura-Hata para el medio urbano

Curvas generadas para aplicaciones móviles, similares a las de la Rec CCIR 370.

Facilitan intensidad de campo, para medio urbano, diversas alturas de antenas, bandas 150, 450, 900, 1800 MHz y PRA=1kW, altura típica del receptor 1,5 m.

A continuación se reproducen las gráficas de Okumura para 450 y 900 MHz.

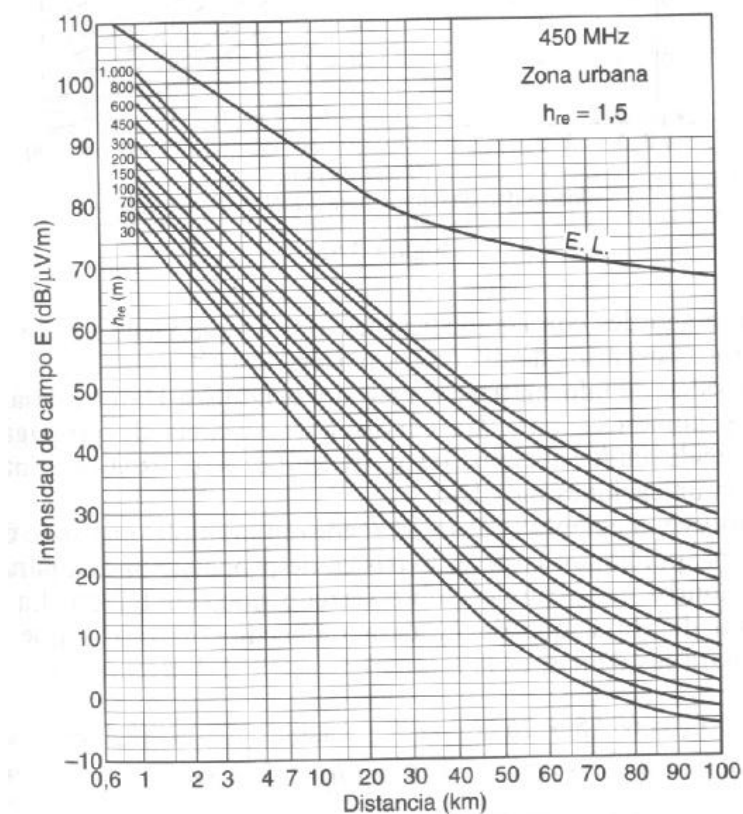


Fig. 33. Gráfica de Okumura para 450 MHz. Intensidad de campo para 1 KW PRA, L = 50 %.

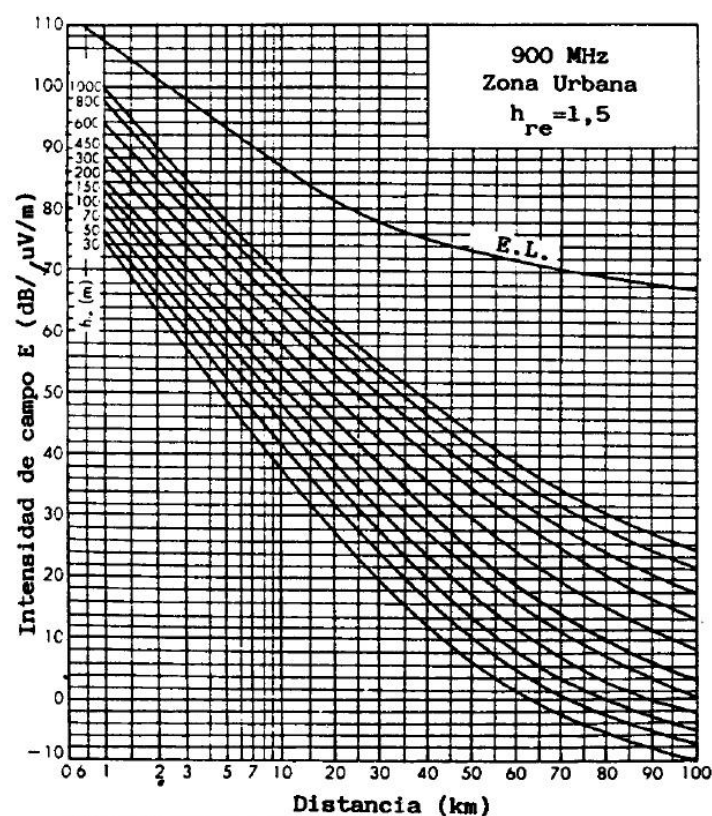


Fig. 34. Gráfica de Okumura para 900 MHz. Intensidad de campo para 1 KW PRA, L = 50 %.

Las curvas se acompañan de correcciones para tener en cuenta:

- Ondulación del terreno (Δh).
- Pendiente del terreno.
- Presencia de obstáculos significativos.
- Heterogeneidad del terreno (mar / tierra).
- Altura antena receptora.
- Potencia radiada aparente.
- Orientación de calles.
- Densidad de codificación.

Es un método complejo que da resultados acordes con las mediciones y se usa mucho en todos los países.

Hata desarrolló expresiones numéricas para las curvas de Okumura incluyendo las correcciones más usuales, para medios urbanos, suburbanos y rurales.

$$L_B = 69.55 + 26.16 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \cdot \log(d)) \quad (3.49)$$

Donde:

- f (MHz) $150 < f < 1500$.
- $h_t(m)$ $30 < h_t < 200$ altura del transmisor.
- $h_m(m)$ $1 < h_m < 10$ altura del receptor.
- d (km) $1 < d < 20$.
- $a(h_m)$ corrección por altura receptor.

Según el tipo de población la corrección por altura del receptor es diferente:

- Si la ciudad es media-pequeña entonces:

$$a(h_m) = (1.1 \log(f) - 0.7) \cdot h_m - (1.56 \log(f) - 0.8) \quad (3.50)$$

- Si la ciudad es grande entonces:

$$a(h_m) = 9.29 \cdot (\log(1.54) \cdot h_m)^2 - 1.1 \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad (3.51)$$

$$a(h_m) = 3.2 \cdot (\log(11.75) \cdot h_m)^2 - 4.97 \quad f \geq 400 \text{ MHz} \quad (3.52)$$

Para zonas suburbanas con edificios de baja altura y calles relativamente anchas:

$$L_{bs} = L_b - 2 \cdot \left(\log\left(\frac{f}{28}\right) \right)^2 - 5.4 \quad (3.53)$$

Para zona rural:

$$L_{br} = L_b - 4.78 \cdot (\log(f))^2 + 18.33 \cdot \log(f) - 40.94 \quad (3.54)$$

3.4.3 Método COST 231 para el medio urbano

Para estimar la L_b en un medio urbano se han propuesto varios métodos que incorporan el efecto de las estructuras urbanas (calles, edificios) en los que se encuentra el móvil.

Se suelen utilizar en comunicaciones móviles.

El método se aplica en situaciones en las que el rayo directo entre transmisor y receptor está obstruido por edificios.

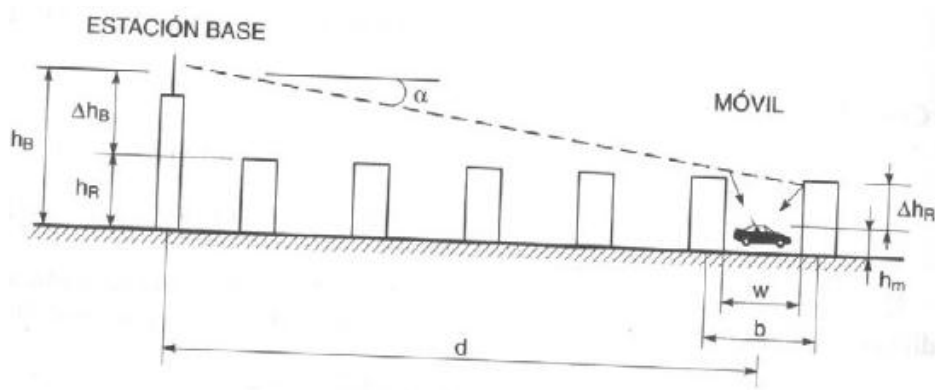


Fig. 35. Alzado de calles.

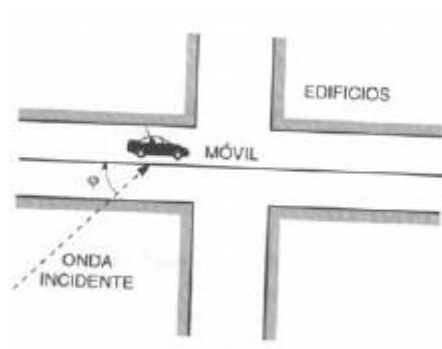


Fig. 36. Planta de calles.

Parámetros que intervienen en los cálculos:

- h_B = altura sobre el suelo estación base (m).
- h_m = altura sobre el suelo receptor móvil (m).
- h_R = altura media de los edificios (m).
- w = anchura de la calle donde está el móvil (m).
- b = anchura entre centros de edificios (m).
- d = distancia estación base – móvil (m).
- α = ángulo de inclinación del rayo ($^\circ$).
- φ = ángulo del rayo con el eje de la calle ($^\circ$).
- $\Delta h_B = h_B - h_R$
- $\Delta h_R = h_R - h_m$

La pérdida básica de propagación se calcula mediante:

$$L_B = L_{Bf} + L_{RTS} + L_{msd} \quad (3.55)$$

Donde L_{Bf} es la pérdida en espacio libre:

$$L_{Bf} = 34.45 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (Km) \quad (3.56)$$

L_{RTS} es la pérdida por difracción terraza – calle:

$$L_{RTS} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_R + L_{ORI} \quad (3.57)$$

Si $L_{RTS} < 0 \rightarrow L_{RTS} = 0$.

L_{RTS} tiene en cuenta el ángulo φ entre el rayo y el eje de la calle:

$$L_{ORI} = \begin{cases} -10 + 0,3571 \varphi & 0 < \varphi < 35 \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ) & 35 \leq \varphi < 55 \\ 4,0 - 0,1114(\varphi - 55^\circ) & 55 \leq \varphi < 90 \end{cases} \quad (3.58)$$

L_{msd} es una estimación de la difracción multiobstáculo:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (3.59)$$

$$L_{bsh} = -18 \log(1 + \Delta h_b) \quad (3.60)$$

Si $\Delta h_b < 0 \rightarrow L_{bsh} = 0$.

$$K_a = \begin{cases} 54 & \text{para } \Delta h_B \geq 0.5 \\ 54 - 0.8 \Delta h_B & \text{para } \Delta h_B < 0 \text{ y } d > 0.5 \\ 54 - 0.8 \Delta h_B \cdot d/0.5 & \text{para } \Delta h_B < 0 \text{ y } d > 0.5 \end{cases} \quad (3.61)$$

$$K_d = \begin{cases} 18 & \text{para } \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - 15 \Delta h_B / h_R & \text{para } \Delta h_B < 0 \end{cases} \quad (3.62)$$

$$K_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{ciudades de tamaño medio y zonas suburbanas} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{grandes centros metropolitanos} \end{cases} \quad (3.63)$$

Los valores urbanos por defecto son:

- b : 20 – 50 m.
- w : $b/2$.
- $h_R = 3 \cdot (\text{número de pisos}) + \text{tejado}$.
- $\text{Tejado} = (3m) \text{ urbano}, \emptyset \text{ plano}$.
- $\varphi = 90^\circ$.

El modelo es aplicable con los siguientes parámetros:

- $800 < f < 2000 \text{ MHz}$
- $4 < h_B < 50 \text{ m}$
- $1 < h_m < 3 \text{ m}$
- $0.02 < d < 5 \text{ km}$

3.4.4 Propagación en espacio libre

Los cálculos de propagación en espacio libre se utilizan para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe línea de visión directa. Para dos antenas separadas una distancia r , conectadas a sus correspondientes transmisor y receptor, la ecuación de transmisión de Friis establece la relación entre la potencia recibida y la radiada. La potencia que la antena receptora entregara a su carga adaptada tiene un valor:

$$P_L = \frac{P_r}{4\pi r^2} D_r A_{efR} \quad (3.64)$$



Fig. 37. Balance de potencia entre dos antenas.

Se puede relacionar la directividad y el área efectiva de cualquier antena. Esto permite describir la ecuación anterior en términos de la directividad que tendría la antena receptora si actuara como transmisora:

$$\frac{A_{ef}}{D} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (3.65)$$

Resultando entonces:

$$\frac{P_L}{P_r} = (\lambda/4\pi r)^2 D_T D_R \quad (3.66)$$

El término $(\lambda/4\pi r)^2$ se denomina pérdida de transmisión en espacio libre, L_0 , y se corresponde con la pérdida de transmisión entre antenas isotropas. Tomando, en decibelios, un valor.

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) = 22 + 20 \log \left(\frac{r}{\lambda} \right) = 32.5 + 20 \log f + 20 \log r \quad (3.67)$$

En general se tiene:

$$\frac{P_L}{P_r} = L_0 + D_r + D_R - L \text{ (dB)} \quad (3.68)$$

Donde todos los términos se expresan en decibelios.

L engloba los factores de pérdida provocadas por la desadaptación en las antenas y las pérdidas.

Desde el punto de vista del computo del balance de potencia en sistemas de comunicaciones, es preferible referir la potencia recibida, P_R , a la potencia transmitida, P_T , entendida en este caso como la entregada a la antena. La ecuación de transmisión resultante se escribe en términos de las ganancias de las antenas y en el factor de pérdidas L' , no se han de contabilizar las pérdidas en las antenas, por estar ya incluidas en las ganancias.

$$\frac{P_L}{P_r} = L_0 + D_r + D_R - L' \text{ (dB)} \quad (3.69)$$

3.5 Métodos determinísticos de predicción de propagación

Estos métodos están basados en la teoría de la propagación de ondas electromagnéticas. A diferencia de los métodos estadísticos, los métodos determinísticos necesitan un gran detalle en la descripción del entorno, dando así unas predicciones mucho mas precisas de la propagación de la señal.

En teoría, las características de la propagación electromagnética podrían ser calculadas resolviendo las ecuaciones de Maxwell, desafortunadamente, esto requiere unas operaciones matemáticas muy complejas y por tanto, un coste computacional extremadamente alto.

Por ello, existen otras técnicas, como el trazado de rayos que no resuelven exactamente las ecuaciones de Maxwell, pero dan un muy buen resultado con un coste computacional sostenible.

3.5.1 Técnicas de trazado de rayos

3.5.1.1 Método de simulación utilizado: trazado de rayos 3D

El modelo que se ha utilizado ha sido el de trazado de rayos, modelo que fue anteriormente implementado en otro proyecto fin de carrera.

El procedimiento básico en un método de trazado de rayos (Figura 38) es el algoritmo de lanzamiento de rayos [3-4]. En primer lugar, un rayo es lanzado desde la antena de transmisión, después el rayo es trazado para ver si choca con algún objeto o con la antena receptora.

Cuando el rayo es interceptado por un objeto, sucede alguno de los fenómenos de propagación como la reflexión, la transmisión, la difracción o el *scattering* dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas del objeto. Cuando un rayo es recibido por una antena, el campo eléctrico asociado a ese rayo es calculado.

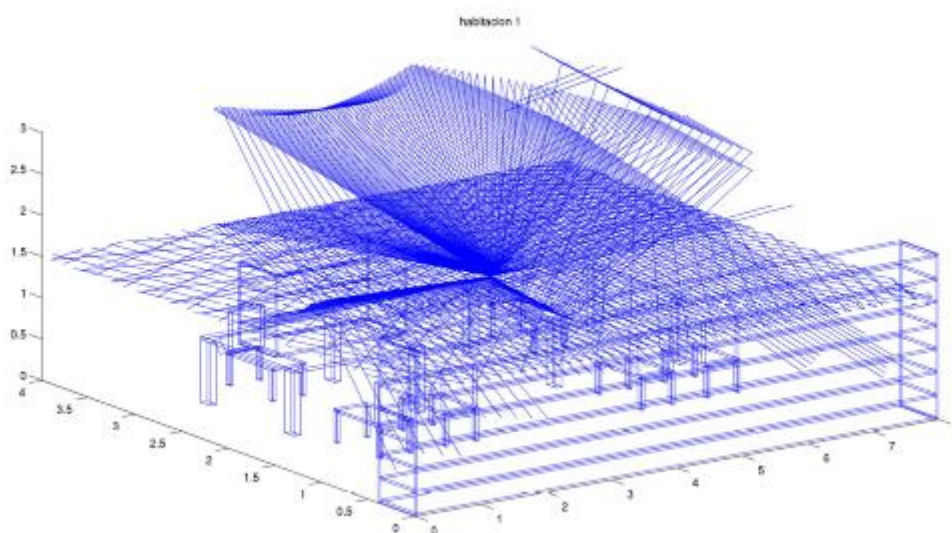


Fig. 38. Vista en 3D de los rayos lanzados por el algoritmo.

Este algoritmo tiene una serie de problemas que deben ser resueltos como por ejemplo:

- ¿Cómo lanzar un rayo?
- ¿Cómo determinar si un rayo impacta con un objeto?
- ¿Con que objeto?
- ¿Como determinar cuando un rayo es recibido por una antena receptora?
- Etc.

Algunas de las características del trazado de rayos en tres dimensiones son:

- Recreación de una propagación multitrayecto realista.
- Modelado en tres dimensiones de todo tipo de entornos complejos con habitaciones, múltiples plantas, múltiples edificios con diferentes formas y tamaños.
- Caracterización y modelado de cualquier tipo de objeto mediante su forma tridimensional y su constante dieléctrica.

- Caracterización de objetos o personas en movimiento.
- Implementación de los fenómenos de la difracción, refracción, reflexión y *scattering*.
- Cálculo de las interacciones entre los rayos y los objetos teniendo en cuenta la polarización de la onda.
- Modelado de cualquier tipo de antena transmisora o receptora.
- Duración de la simulación de un rayo determinado caracterizable mediante número de rebotes, retardo máximo, magnitud de campo eléctrico mínimo, etc.

3.5.1.2 Otros métodos: el método de las imágenes y los métodos híbridos

El método de las imágenes es un método simple y preciso para determinar la trayectoria del rayo entre el transmisor y el receptor. En la figura 39 se puede ver la idea básica de este método.

En este caso, el primer lugar se determina la imagen de Tx por W1. Después se determina la imagen de Tx1 por W2 y conectando Rx con Tx2 se puede encontrar el punto de reflexión P2 en W2. Otro punto de reflexión (P1) es el punto de intersección de la línea que conecta P2 con Tx1.

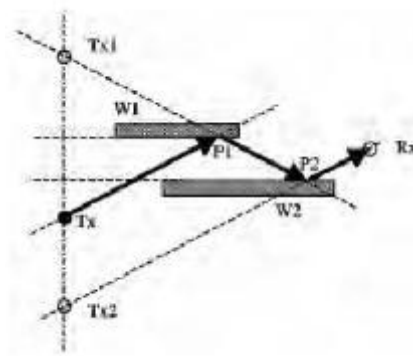


Fig. 39. Ilustración del método de las imágenes.

El método de las imágenes es preciso, pero es muy ineficiente cuando el número de muros es alto. Para aplicaciones realistas, se usan métodos híbridos para reducir el tiempo computacional.

Los métodos híbridos combinan los métodos de lanzamiento de rayos y de las imágenes.

El método de lanzamiento de rayos es utilizado para identificar rápidamente posibles trayectorias entre Tx y Rx. Cuando se encuentra una trayectoria, los muros que están envueltos en ella se determinan, y los puntos de reflexión exactos se determinan por el método de las imágenes.

Las ventajas de estos métodos híbridos es que combinan la eficiencia del lanzamiento de rayos y la exactitud del método de las imágenes.

3.5.2 Método FDTD

Para estructuras complejas con dimensiones finitas, las técnicas de trazado de rayos no consiguen exactitud en los campos dispersados (*scattered*). En un sistema de comunicaciones complejo, las antenas de transmisión y recepción se instalan cerca de estructuras con unas propiedades materiales complejas.

Estos problemas se pueden resolver numéricamente por las ecuaciones de Maxwell. En particular, el método Finite-Difference Time-Domain (FDTD) es una alternativa.

Las ventajas del método FDTD son la exactitud del mismo y que se consigue una solución completa para cada punto del espacio, lo cual da información sobre la cobertura de señal en toda el área de estudio.

Como FDTD es un método numérico, requiere de mucha memoria y coste computacional para conseguir una solución, y es por esto por lo que es inviable para calcular las coberturas en áreas grandes.

3.5.3 Método de momentos

Aunque los métodos de trazado de rayos pueden ser usados con suficiente precisión para calcular las coberturas en edificios grandes con un gran número de muros, el método de los momentos (MoM) es mejor cuando se necesita más precisión en entornos más pequeños.

Es posible también utilizar una combinación de ambos métodos, usándolos cada uno en sus entornos óptimos.

Las soluciones determinadas por el modelo MoM son exactas mientras los objetos estén suficientemente caracterizados.

Debido a las limitaciones de memoria de los ordenadores, y del coste computacional de este método, éste se usa en estructuras del orden de varias veces la longitud de onda de la señal.

De esta forma, se puede usar este método para comprobar la exactitud del trazado de rayos en estos casos.

3.6 Sistemas de comunicaciones ferroviarios actuales

El ferrocarril [10] ha superado sus primeros 150 años y requiere para su desarrollo de la más alta tecnología disponible en los campos de la electrónica de potencia, de la ingeniería industrial, de la ingeniería de procesos, de los sistemas de información y de las telecomunicaciones.

En este apartado se repasan los avances que ha supuesto para el ferrocarril la incorporación de las tecnologías de telecomunicación en el despliegue y modernización de las infraestructuras ferroviarias.

También se expone cómo la nueva generación de líneas de alta velocidad ha supuesto la incorporación a España de las últimas tecnologías e innovaciones, situando a España en un lugar preminente en Europa en materia de telecomunicaciones ferroviarias.

3.6.1 Sistema tren tierra clásico (analógico)

El sistema de comunicaciones tren-tierra [9] es un sistema analógico que se empezó a implantar en España en el año 1983 desarrollado por la empresa AEG y continuado por Alcatel Standard Eléctrica.

Es un sistema analógico tipo dúplex que establece un canal telefónico de 300 – 3400 Hz apto para la transmisión y fonía de datos.

Sólo un equipo puede hablar simultáneamente con el puesto central. El puesto central se encuentra ubicado en cada uno de los puestos de mando, y está formado por el subsistema de comunicación y el subsistema de gestión. Se encarga de interrogar a todos los puestos fijos y permite la localización y el diagnóstico de las averías más importantes.

Los puestos fijos se distribuyen a lo largo de la línea férrea en función de unos parámetros de calidad de la señal. Emiten continuamente con una potencia de 6 W en las bandas de frecuencias entre 447 MHz y 459 MHz con una canalización de 25 KHz. El consumo aproximado es de 500 W.

El enlace del equipo móvil con el puesto central se efectúa a partir de un determinado puesto fijo estando el criterio de comunicación basado en la intensidad y en la calidad de la señal recibida.

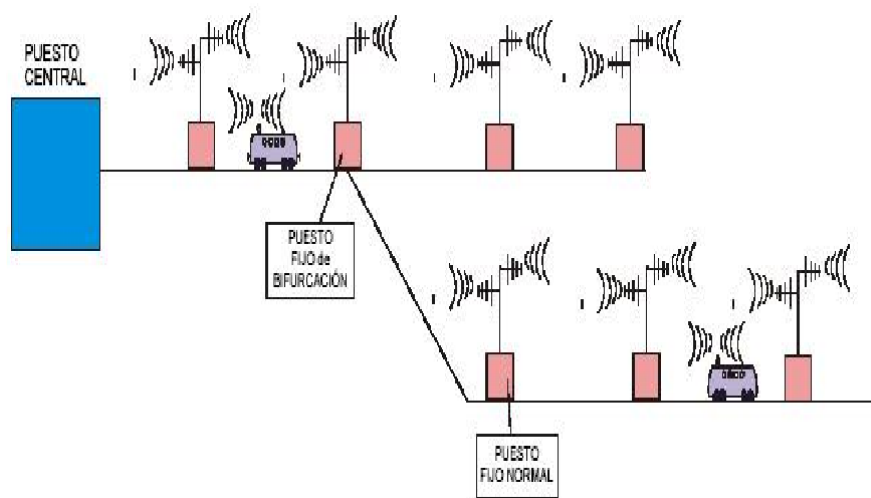


Fig. 40. Radio comunicación tren-tierra analógico.

3.6.2 Sistemas digitales (GSM-R)

El desarrollo de telecomunicaciones específico más significativo para el ferrocarril ha sido el sistema europeo de radio digital GSMR [11].

Emplea la tecnología de los teléfonos móviles de uso público GSM, adaptado para el uso ferroviario. El GSM-R se comenzó a aplicar en España (de hecho, fue una de las primeras aplicaciones europeas) en la nueva línea de alta velocidad de Madrid a Barcelona, y resuelve buena parte de los retos que en materia de comunicaciones se plantean al ferrocarril, y además lo hace de forma coherente en todo el espacio europeo, sustituyendo a las tecnologías específicas de cada uno de los países.



Fig. 41. Antena del sistema GSM-R en una línea de alta velocidad.

Dispone de unas frecuencias específicas y reservadas que le permiten no entrar en conflicto con las bandas reservadas a los operadores de telefonía comerciales y que le permiten su expansión en los ferrocarriles europeos al disponer de un ancho de banda reservado en el espectro europeo.

La arquitectura es similar a la del sistema público GSM, con la diferencia de la existencia de una base de datos en la central de conmutación que gestiona los grupos de llamada (GCR), esencial para determinados tipos de llamada de la operativa asociada a la circulación de trenes.

Con el fin de facilitar la explotación ferroviaria se definieron y desarrollaron una serie de servicios avanzados que utilizan la plataforma de red inteligente.

Con el GSM-R, cada administración ferroviaria se constituye en un operador de telefonía móvil que dispone de su licencia otorgada por la autoridad reguladora de las telecomunicaciones, que le permite crear su propio plan de numeración, y que gestiona de forma autónoma.

La principal ventaja de este sistema de radio es que, al ser propio, le asegura la fiabilidad y seguridad intrínseca a los medios ferroviarios. Así le permite contar con los usuarios únicamente ferroviarios; la disponibilidad de una gestión inteligente le permite disponer de funciones que no se encuentran en las aplicaciones de GSM comerciales, que son las llamadas funciones de aplicación ferroviaria: llamadas de emergencia a todos los usuarios, numeración funcional del número de circulación de tren, llamadas en maniobras, etc.

También le permite disponer y configurar niveles de priorización de llamadas y de enrutamiento de las llamadas desde el tren al gestor de la circulación, etc.

Pero este sistema no sólo se utiliza para transmisión de voz, sino que en su funcionalidad de transmisión de datos es utilizada para el *Nivel 2* de sistema de señalización y supervisión de la circulación común europeo ETCS/ERTMS, haciendo posible con ello la comunicación permanente entre el equipo embarcado en los trenes y el sistema “Radio Block Center” que permite transmitir las autorizaciones de movimiento a los trenes de forma continua.

3.6.3 Sistemas de *trunking* digital: TETRA

El Sistema de Radiocomunicaciones TETRA (Trans European Trunked RAdio) permite la transmisión de voz y datos en las distintas modalidades previstas por dicho estándar (mensajes de estado, datos cortos, y datos en modo paquete).

El sistema TETRA está constituido básicamente por dos tipos de emplazamientos denominados:

- Emplazamiento Maestro (Centro de Gestión y Conmutación).
- Emplazamientos Remotos (las Bases de Cobertura Radio).

El estándar TETRA (Trans European Trunking RAdio) es el único estándar europeo para redes radio *trunking* digitales avanzadas. Desarrollado por el Instituto Europeo de Estandarización de Telecomunicaciones (ETSI), está especialmente concebido para cubrir las necesidades de comunicaciones de voz y datos de usuarios de redes privadas de radio (PMR) que tienen que enfrentarse a la congestión del tráfico y a una demanda creciente de servicios de voz y datos que los actuales sistemas analógicos no pueden suministrar.

En Europa las nuevas emisiones digitales se sitúan entre 380 y 400Mhz.

TETRA es un estándar abierto con espectro radioeléctrico armonizado que asegura a los posibles usuarios y operadores beneficios tales como:

- Mayor eficiencia de uso del espectro radioeléctrico: cuatro canales por portadora de 25 KHz. La asignación de los canales de tráfico se realizará automáticamente por el sistema en función de la demanda (tecnología *trunking*).
- Versatilidad en las llamadas de grupo, privada, individual, modo directo, etc.
- Asignación de canal según la prioridad del usuario.
- Suministro de múltiples fabricantes, tanto de infraestructuras como de terminales de usuario.
- Reducción de los costes de equipamiento gracias a la economía de escala.
- Reducción de los costes de operación mediante la compartición de recursos.

CAPÍTULO IV

Resultados de simulación y medida.

4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

4.1 Descripción del escenario de simulación

El escenario de partida a considerar es la interconexión mediante el empleo de motas ZigBee de un conjunto de vagones de tren. Dichos vagones son en principio homogéneos y el objetivo de la cadena de comunicación establecida es poder ofrecer un medio de transporte tanto para elementos de información generados en el interior de los vagones como para la intercomunicación general de datos a lo largo de todo el tren.

Las dimensiones de los vagones que se han considerado son las medidas reales de los trenes de mercancías que utiliza Renfe [2]. La estructura de dicho escenario así como el detalle de la interconexión de dos vagones se muestra en la siguiente figura:

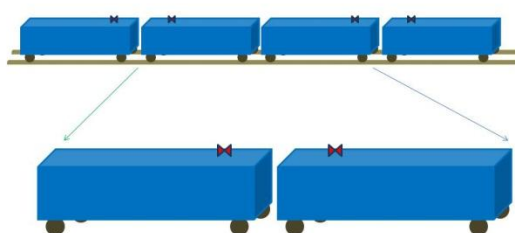


Fig. 42. Representación esquemática de la interconexión entre vagones de tren.

Cabe destacar que desde el punto de vista radioeléctrico, el escenario presenta la particularidad de operar en un recinto abierto, con un gran contenido metálico, propio de los contenedores de mercancías.

La estimación de pérdidas de radiopropagación, debido precisamente a dicho entorno, se realizará mediante el método determinista de trazado de rayos [3-4]. En concreto, se utilizará un algoritmo de lanzado de rayos en 3 dimensiones implementado en *Matlab* en la Universidad Pública de Navarra.

Dicho código tiene en cuenta los procesos de reflexión, refracción y difracción de primer orden, así como las propiedades de los materiales que hay en el escenario en términos de su constante dieléctrica y su tangente de pérdidas.

La ventaja de utilizar esta metodología radica en el compromiso de obtener resultados de alta precisión sin tener que recurrir a largos tiempos de cálculos.

El escenario de simulación es sencillo: se tienen dos vagones representados por dos cubos cuyas paredes están compuestas de material metálico, ubicados en una habitación vacía, es decir, el material interior de la habitación es de aire. La siguiente figura muestra el escenario representado en el entorno de *Matlab*:

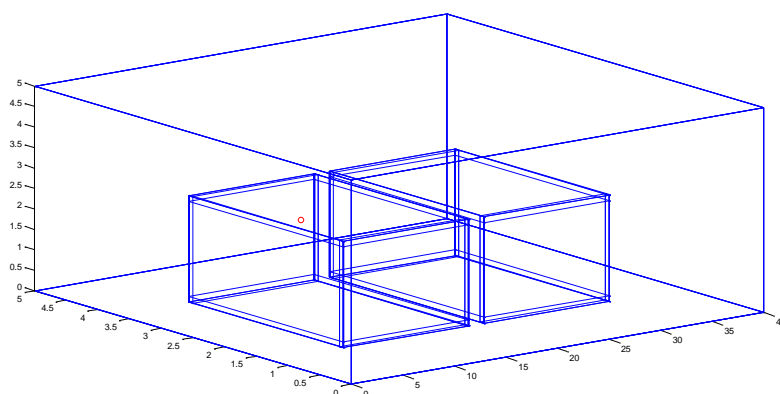


Fig. 43. Representación del escenario de simulación en *Matlab*.

Las dimensiones externas de cada vagón son 12,16/2,44/2,60 cm (Largo/Ancho/Alto) y sus dimensiones internas son 12,05/2,32/2,32 cm (Largo/Ancho/Alto). En función de esto se calculó el grosor de cada una de las paredes que conforman cada vagón, siendo éste de 5,5 cm para la pared frontal y trasera, 6 cm para las paredes laterales y 14 cm para el techo y el suelo. Todas ellas de metal.

A causa de esto se eligió una habitación cuyas dimensiones fueran lo suficientemente grandes como para albergar los vagones y que hubiera espacio entre ellos y cada pared de la habitación, y al mismo tiempo teniendo en cuenta también que la habitación no se excediera en tamaño debido al largo tiempo de simulación que hubiera requerido la simulación de un escenario de grandes dimensiones. Se decidió, por tanto, que las dimensiones fueran 40/5/5 cm (Largo/Ancho/Alto).

La resolución utilizada para el escenario ha sido de cuboides de 6 cm, se ha escogido este valor para obtener resultados de alta calidad en cuanto a resolución se refiere.

Considerando como elementos radiantes monopolos verticales cortos con una potencia de transmisión de 2 mW [5] se han realizado los cálculos mediante el empleo del código de lanzamiento de rayos 3D. Los parámetros de simulación empleados han sido número de rebotes igual a 5, incremento de ϕ y θ de $\pi/90$ y frecuencia de operación de 2.4 GHz con tasa de transmisión de 250 Kbps. La antena utilizada es omnidireccional con polarización lineal vertical y 1.7 dB de ganancia.

4.2 Análisis de los resultados obtenidos

El análisis del comportamiento radioeléctrico parte de la necesidad de interconexión de los vagones. En este sentido, se considera inicialmente una configuración de sistema radiante que pueda quedar ubicado en la cubierta del vagón, lo que en principio facilita la instalación y en caso necesario, permite la interconexión de vagones más alejados, al tener línea de vista.

De esta manera, se define una retícula sobre el techo del vagón con un total de veintidós posiciones en las que se propone la ubicación de los transceptores, tal y como muestra la Figura 44. Las diferentes posiciones que se han considerado están separadas entre sí a una distancia aproximada de un metro, ya que a menor distancia la diferencia en los resultados no sería demasiado significativa.



Fig. 44. Retícula que muestra las diferentes posiciones de antena a considerar sobre el techo del vagón.

Este dibujo muestra la colocación de las antenas sobre el techo del vagón (vista aérea) para darnos una idea del planteamiento inicial del problema. Sobre cada una de estas posiciones se han obtenido planos bidimensionales de potencia recibida para distintas alturas, curvas de potencia en función de la distancia, en forma de radiales y perfiles de retardo potencia.

La siguiente figura muestra la situación en que la que se colocaría un transceptor en uno de los casos a tener en cuenta (el de la primera ubicación de los transceptores en concreto) para una vista de planta y otra de perfil para dar una idea de cómo quedaría sobre la cubierta del vagón:

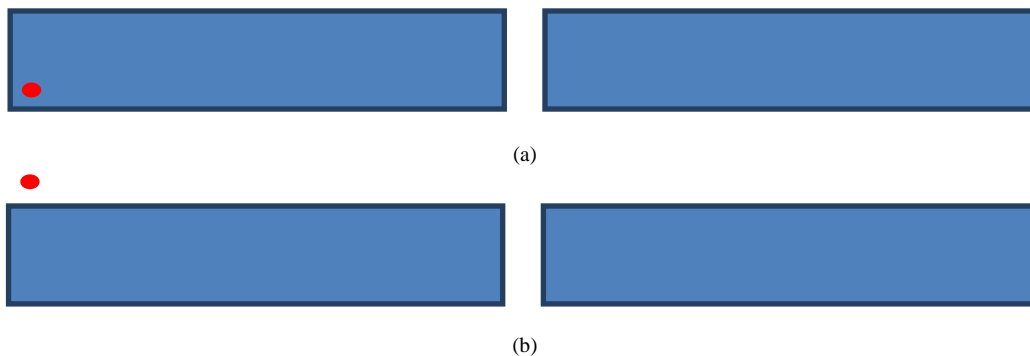


Fig. 45. Representación esquemática de la primera ubicación de antena considerada, con vistas de planta (a) y de perfil (b).

Se debe tener en cuenta que los monopolos verticales cortos tienen cierta longitud, por ello esto se ha tenido en cuenta a la hora de realizar las simulaciones, y se han colocado elevados 10 cm por encima de la cubierta del vagón.

El hecho de haber elegido las alturas que se han escogido concretamente, ha sido un procedimiento aleatorio. Se decidió que fueran éstas por tener un conocimiento de la casuística del problema para un plano que queda por debajo de las antenas (altura de 2 m) y que muestra lo que ocurre dentro de los vagones (ya que muestra un corte en la altura de 2 m), para otro plano que queda por encima de las mismas (altura de 3 m) y otro plano situado a una altura intermedia (altura de 2.6 m).

De todas formas como se ha dicho arriba se podían haber elegido otras distintas sin que esto tenga una fuerte repercusión en los resultados finales.

4.2.1 Análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario

A continuación se muestra un análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario para un caso en concreto, el de la primera ubicación del transceptor y para sus diferentes planos de altura.

Los planos bidimensionales de potencia recibida para la primera posición de las antenas son los siguientes:

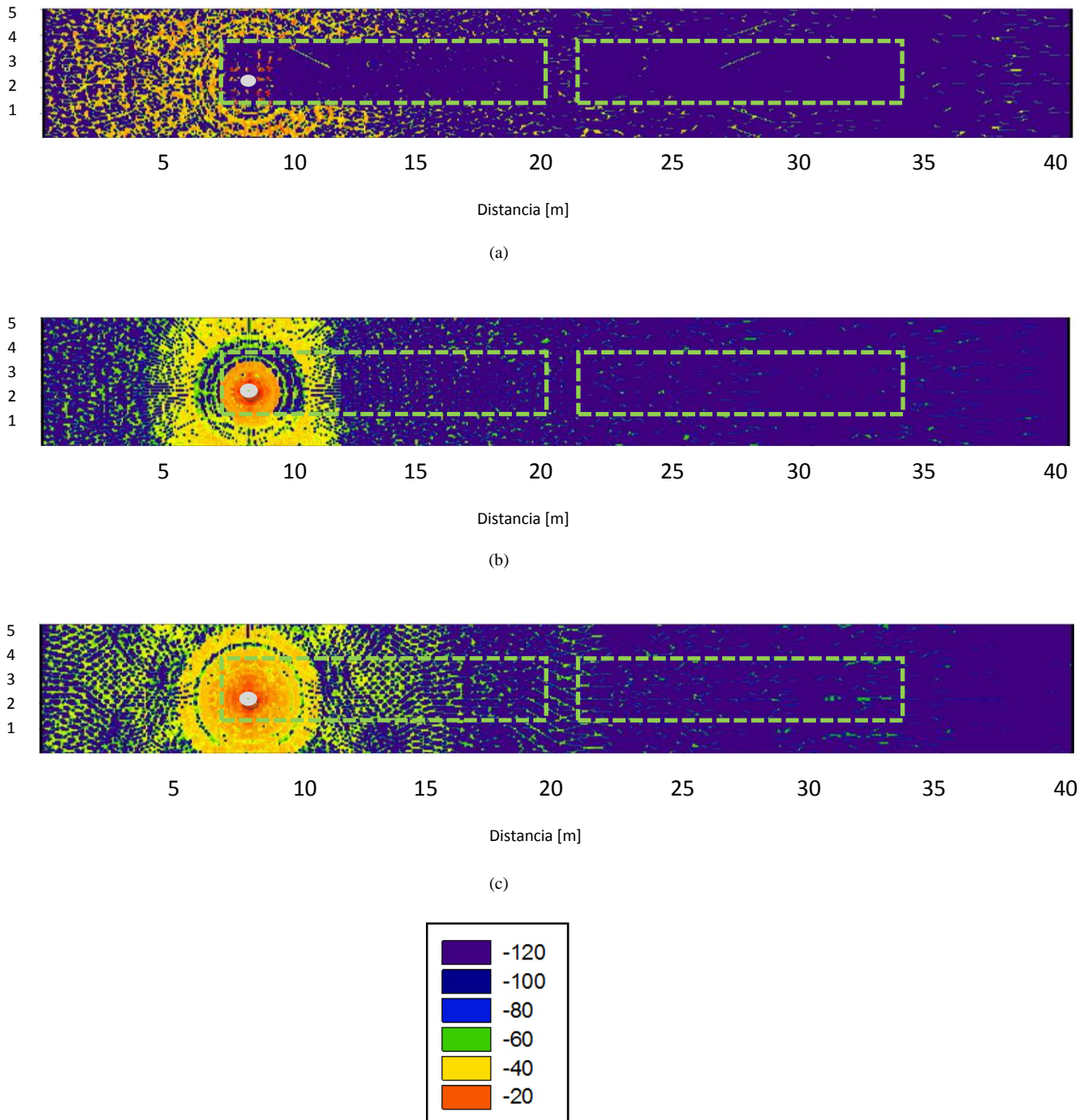


Fig. 46. Potencia recibida (dBm) para la altura de (a) 2 m, (b) 2.6 m y (c) 3 m. El símbolo de color gris muestra donde se coloca la antena transmisora.

Se puede observar que la distribución de la potencia recibida es notablemente desigual para los diferentes planos de altura mostrados en las figuras anteriores.

Atendiendo al plano de altura de 2 m, figura 42 (a), se observa que hay una errata en los resultados de simulación obtenidos. Dado que este plano muestra lo que ocurre dentro de los vagones (ya que muestra un corte en la altura de 2 m) no debería penetrar ningún rayo porque el metal es un material que posee un alto índice de reflexión, por lo tanto todos los rayos que impacten sobre la cubierta metálica de los vagones deben reflejarse. Concluir por tanto que se trata de un fallo del algoritmo de trazado de rayos 3D que debe corregirse.

Se percibe además que existen zonas a lo largo de los planos bidimensionales con valores de potencia recibida muy reducidos, por debajo de -120 dBm (en color morado según la leyenda). Con lo que es evidente que no se llegan a cubrir los planos con niveles de potencia lo suficientemente elevados; esto se aprecia de forma más clara en el siguiente vagón, al que apenas llega potencia.

El punto donde se registran los valores más elevados de potencia recibida queda donde está ubicado el mismo transceptor, aquí se tiene la zona de mayor cobertura. Esto se puede ver mejor en los planos de altura 2.6 m y 3 m, figuras 41 (b) y (c).

Se observa de mejor manera también como se va dibujando la distribución de la potencia radiada por la antena.

En el plano de altura 3 m, figura 41 (c), se dibuja una distribución de la potencia radiada más uniforme que en la anterior altura, aparece mucha potencia concentrada en un punto (exactamente donde está colocado el transceptor) y se va extendiendo dibujando una forma más uniforme y circular hasta que esta forma característica desaparece y aparecen zonas en las que la potencia se distribuye de manera no uniforme y de forma dispersa llegando al otro vagón tan solo algunos rayos.

En cualquiera caso, para diferentes alturas, queda de forma clara que no se llegan a cubrir todos los planos con potencia suficiente como para que sea captada por las antenas del siguiente vagón.

Con el fin de poder obtener una estimación cuantitativa del comportamiento del canal radioeléctrico, se han obtenido curvas de potencia en función de la distancia para las alturas anteriores, en forma de radiales para todo el volumen del escenario de simulación.

Las radiales son la representación del siguiente corte en horizontal representado en la figura 47, que se ha realizado al plano desde el principio hasta el final del mismo para analizar como varía la potencia recibida en función de la distancia, como se puede ver en la siguiente figura:

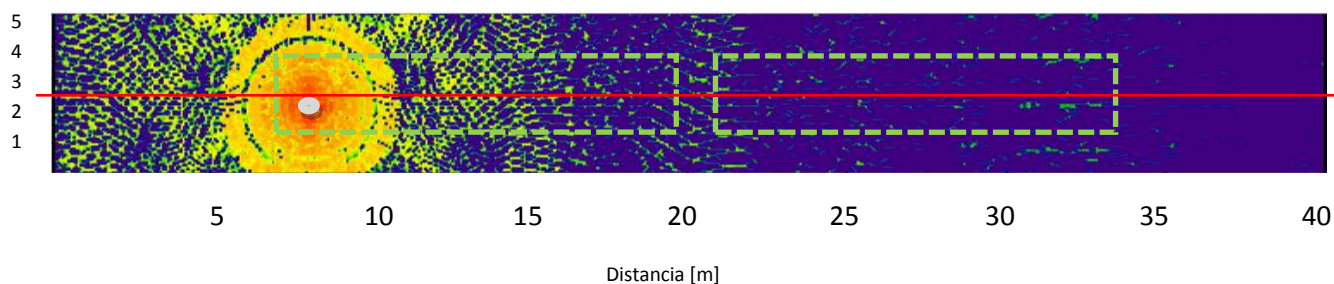


Fig. 47. Figura que muestra el corte en horizontal del plano para trazar las radiales.

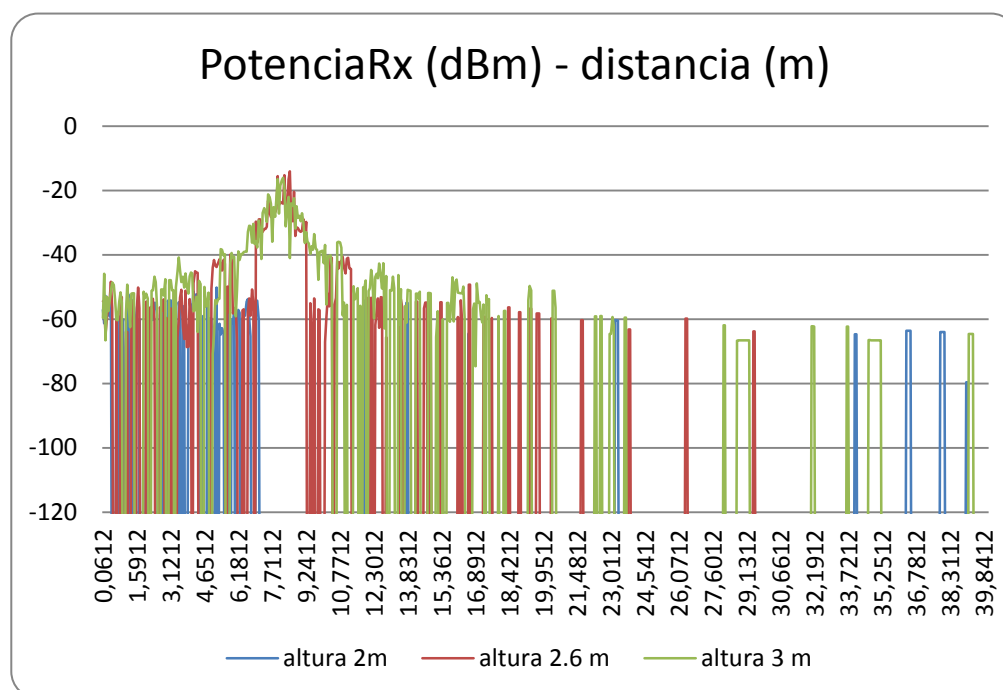


Fig. 48. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) para las diferentes alturas de la primera ubicación del transceptor (2 m, 2.6 m y 3 m).

Como se puede ver en la anterior figura, las radiales obtenidas varían de forma considerable de un plano de altura a otro, en el plano de altura de 2 m apenas se observan algunos máximos de potencia recibida, la mayoría de los cuales no deberían aparecer por lo que se ha explicado anteriormente: la errata en el algoritmo.

El plano de altura de 2.6 m, situado debajo de la antena transmisora, muestra un pico máximo de potencia recibida (que corresponde al lugar donde está situada la antena), así como también otros máximos importantes a cada lado del pico máximo o lóbulos laterales.

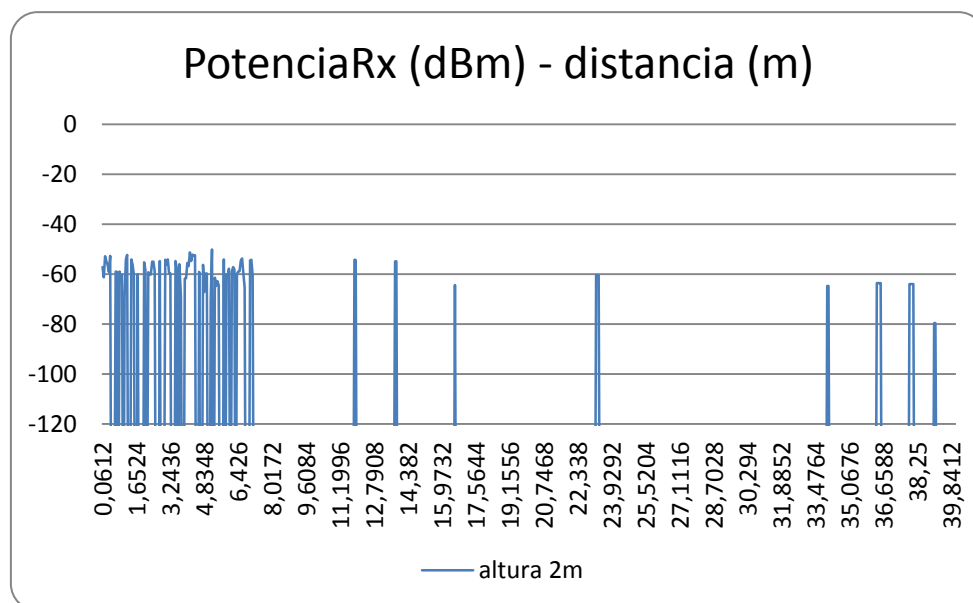
En esta parte del plano es donde quedan concentrados los valores de mayor potencia recibida para esta altura; en el resto del gráfico se aprecia como la distribución de potencia recibida ya no es uniforme y se caracteriza por picos aislados que se distribuyen de manera no homogénea.

En el plano de altura de 3 m, situado por encima de la antena transmisora, se observa también un pico máximo característico pero la potencia queda concentrada de manera más uniforme, ya no se aprecian los lóbulos laterales vistos en el plano de la altura anterior.

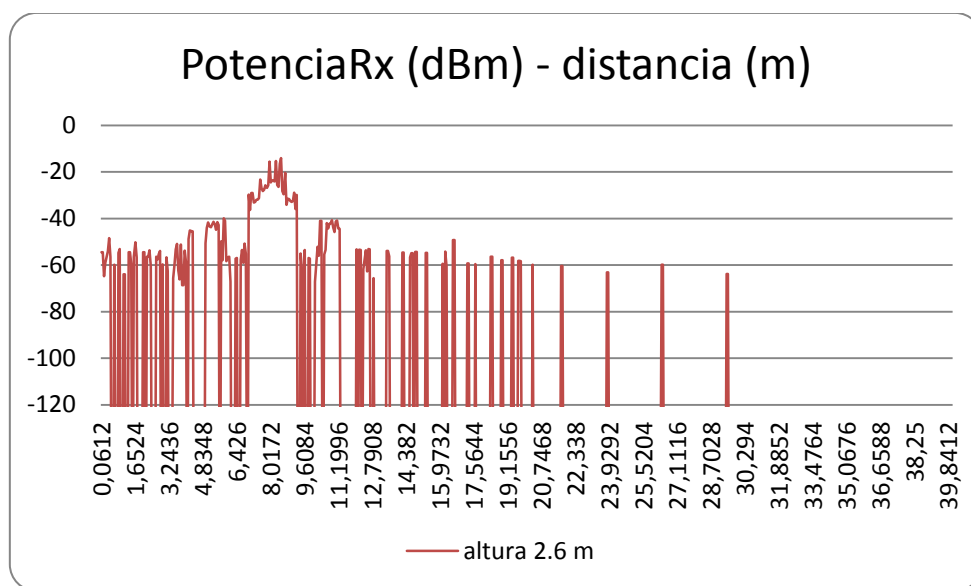
La zona de mayor cobertura del transceptor también queda ubicada en la parte izquierda de la gráfica, mientras que para el resto de la gráfica, ocurre el mismo fenómeno que para el anterior plano de altura: aparecen tan solo algunos picos de potencia aislados.

De nuevo estos resultados corroboran lo visto en los planos bidimensionales: no se llegan a cubrir todos los planos con niveles de potencia lo suficientemente elevados.

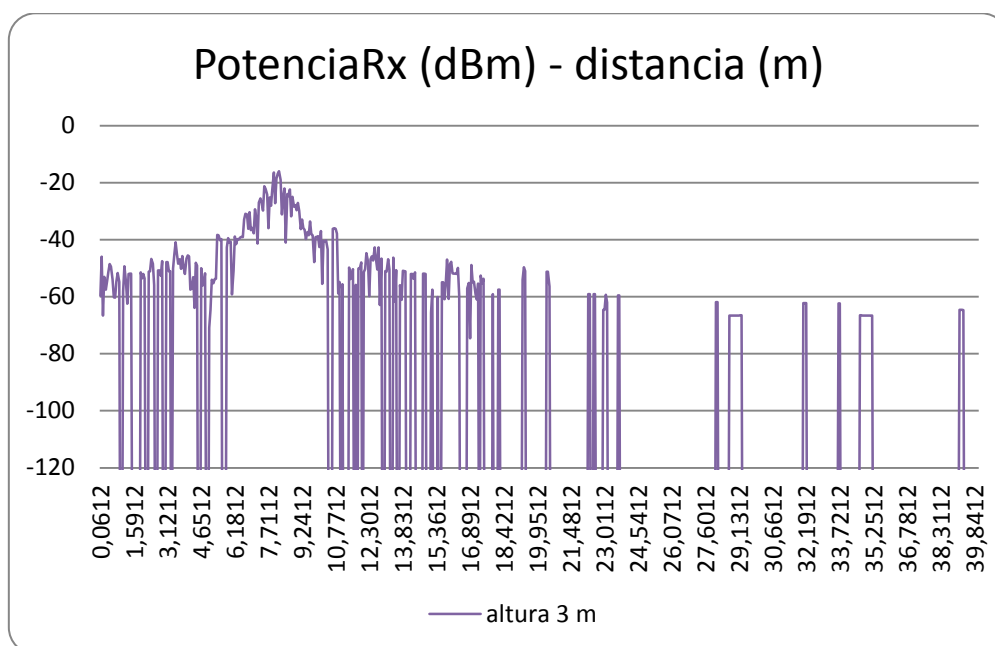
Esto se puede apreciar de manera más clara si se divide la gráfica anterior en los tres planos de altura:



(a)



(b)



(c)

Fig. 49. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) para la altura de (a) 2 m, (b) 2.6 m y (c) 3 m.

Las radiales no son continuas, debido a la aparición de discontinuidades en las que la potencia recibida decae hasta niveles nulos. Estas discontinuidades se observan de mejor manera si se da mayor rango de valores al eje vertical (Potencia Rx en dBm) de los gráficos:

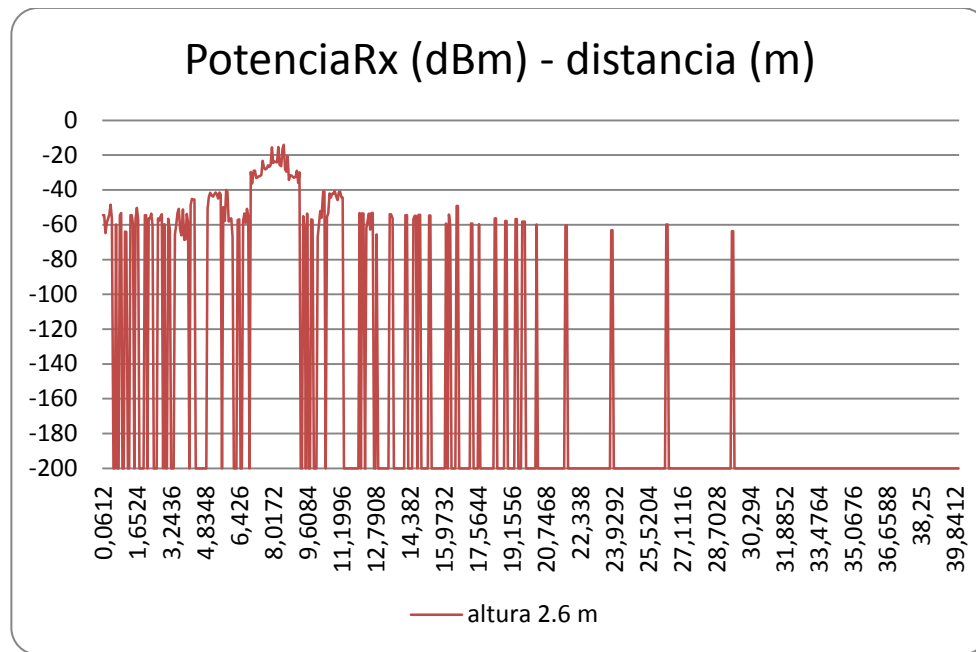


Fig. 50. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) para la altura 2.6 m. Se ve aprecia como la radial presenta discontinuidades observándose una variación desde niveles máximos de potencia hasta niveles nulos.

Las diferencias entre los diferentes planos de altura vienen determinadas por el papel que juega la propagación multirrayecto, es decir, la propagación de la onda por varios caminos diferentes debido a fenómenos como la reflexión y la difracción.

Fenómenos como el de la reflexión se manifiestan para los planos y radiales de altura de 2 m en los que los rayos se reflejan y no penetran en el interior de los vagones de mercancías.

Las características de la propagación multirrayecto también pueden observarse mediante la obtención de los perfiles retardo-potencia. En este sentido, mediante el empleo del código de simulación de lanzamiento de rayos 3D se han obtenido valores de perfiles de retardo-potencia del mismo punto para las diferentes alturas de esta primera ubicación del transceptor:

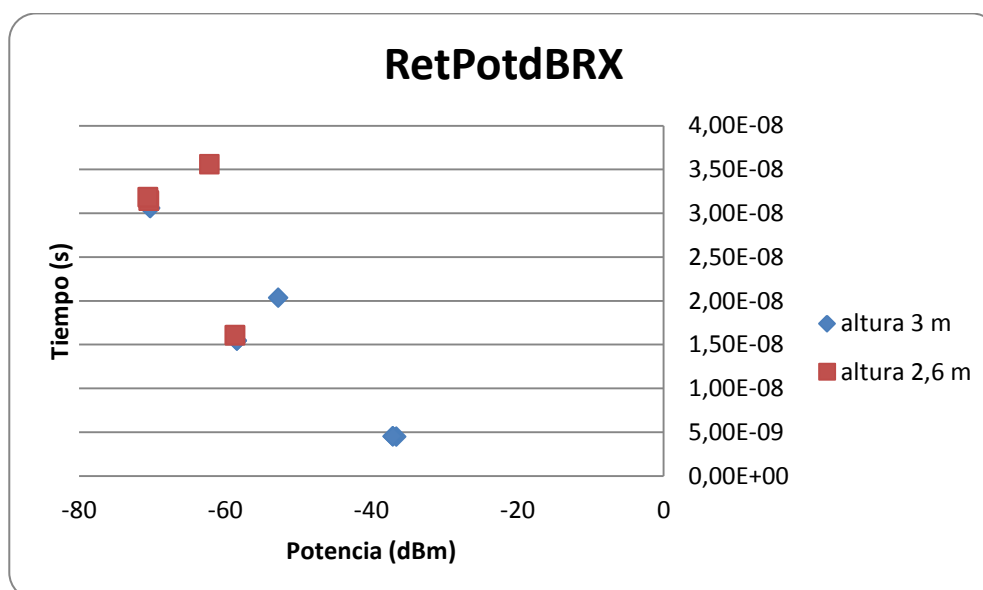


Fig. 51. Estimación de Perfil Retardo Potencia para el mismo punto en las diferentes alturas de la primera ubicación del transceptor (2 m, 2.6 m y 3 m).

Tal y como se observa en la figura anterior, las representaciones de los perfiles retardo-potencia para las distintas alturas presentan variación, tanto en la distribución temporal de los ecos frente a la componente especular, como en el valor de potencia recibida.

Para el plano de altura de 2 m no aparece componente alguna. Esto es debido al alto índice de reflexión del metal que hace que todos los rayos queden reflejados y no penetren en el interior de los vagones.

En cambio para los otros dos planos de altura, se recogen varias componentes en el mismo punto al experimentar propagación multitrayecto debido a los diferentes procesos de reflexión y difracción.

Hay que darse cuenta de que los ecos aparecen en intervalos posteriores de tiempo y con menores niveles de potencia, debido a los fenómenos de la propagación multitrayecto que ocasionan atenuación en los niveles de potencia de los rayos directos.

Esto nuevamente confirma la fuerte dependencia topológica en la respuesta del canal radioeléctrico, lo que tiene un impacto directo en la ubicación de los transceptores en los vagones.

4.2.2 Respuesta del enlace radioeléctrico frente a la sensibilidad

Las curvas de potencia en función de la distancia, en forma de radiales, se han contrastado con las sensibilidades de motas ZigBee, Bluetooth y Wifi de Libelium [5], fabricante de este tipo de productos, para estimar si el sistema cumple o no con los niveles de potencia requeridos en el receptor.

En concreto se han contrastado con los siguientes modelos:

Modelo	Protocolo	Frecuencia	Tx Power	Sensibilidad	Rango*
XBee-802.15.4	802.15.4	2.4GHz	1mW	-92dB	500m
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2.4GHz	100mW	-100dBm	7000m
XBee-ZB	Zigbee-Pro	2.4GHz	2mW	-96dBm	500m
XBee-ZB-Pro	Zigbee-Pro	2.4GHz	50mW	-102dBm	7000m
Wi-Fi	Wifi 802.11b/g	2.4GHz	0dBm - 12dBm	-83dBm	
Bluetooth Chip	Versión Bluetooth 2.0	2.4GHz	2.5dBm	-86dBm	Outdoor 250m
eUnistone 31308/2	+ EDR				Indoor 30m

Fig. 52. Modelos y características de las motas ZigBee, Wifi y Bluetooth de Libelium.

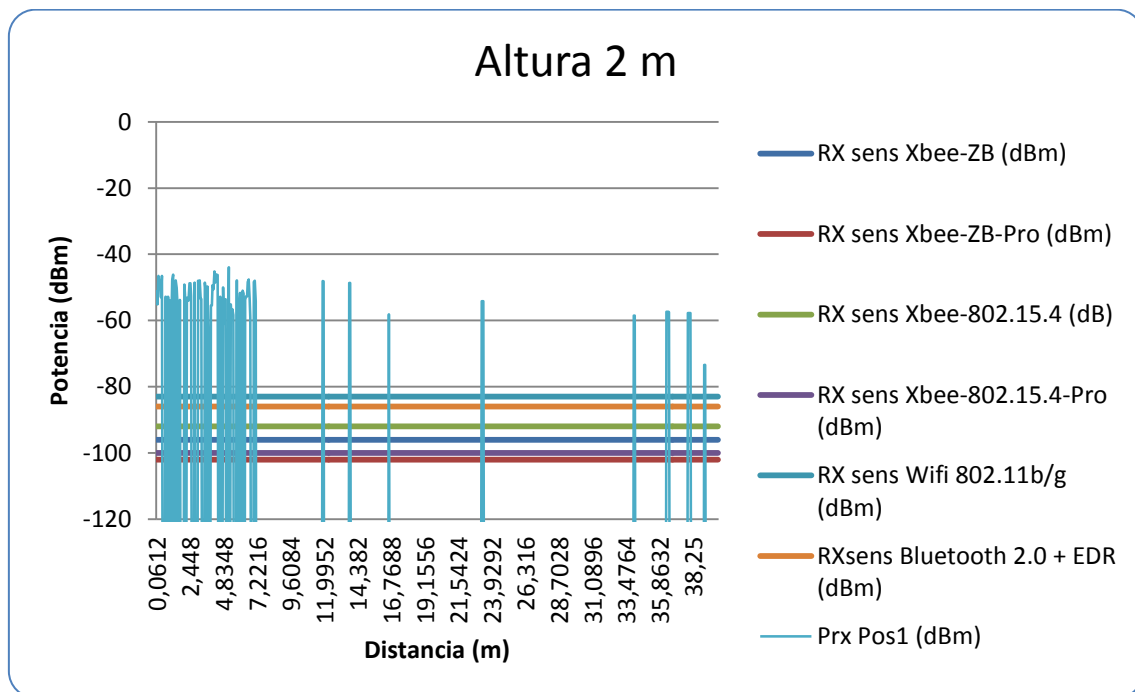
Para ello se ha utilizado la ecuación (3.69) del apartado “3.4.4 Propagación en espacio libre” para obtener la potencia recibida, P_R , en el receptor y compararla frente a las diferentes sensibilidades.

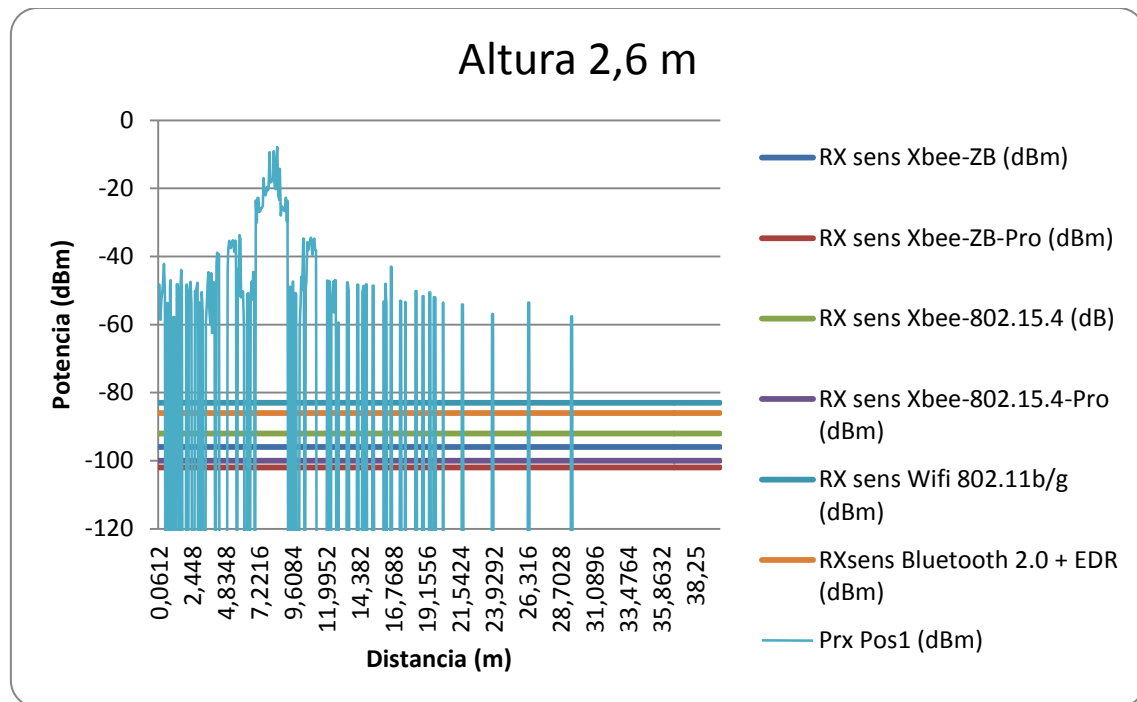
En realidad los valores que se han obtenido como niveles de potencia recibida en los planos bidimensionales y en las radiales de la sección anterior son las pérdidas L_0 del sistema. La potencia de la antena transmisora, P_T , es 2 mW (3 dBm) y los valores de ganancia de las antenas transmisora, G_T y receptora G_R son 1.7 dB y 0 dB respectivamente tal y como se había descrito en la sección “4.1 Descripción del escenario de simulación”. En función de estos se han calculado los valores de potencia recibida P_R .

A continuación se muestran los resultados de las gráficas para dos ubicaciones, una situada en un extremo del vagón y para otra situada en la zona media del mismo.

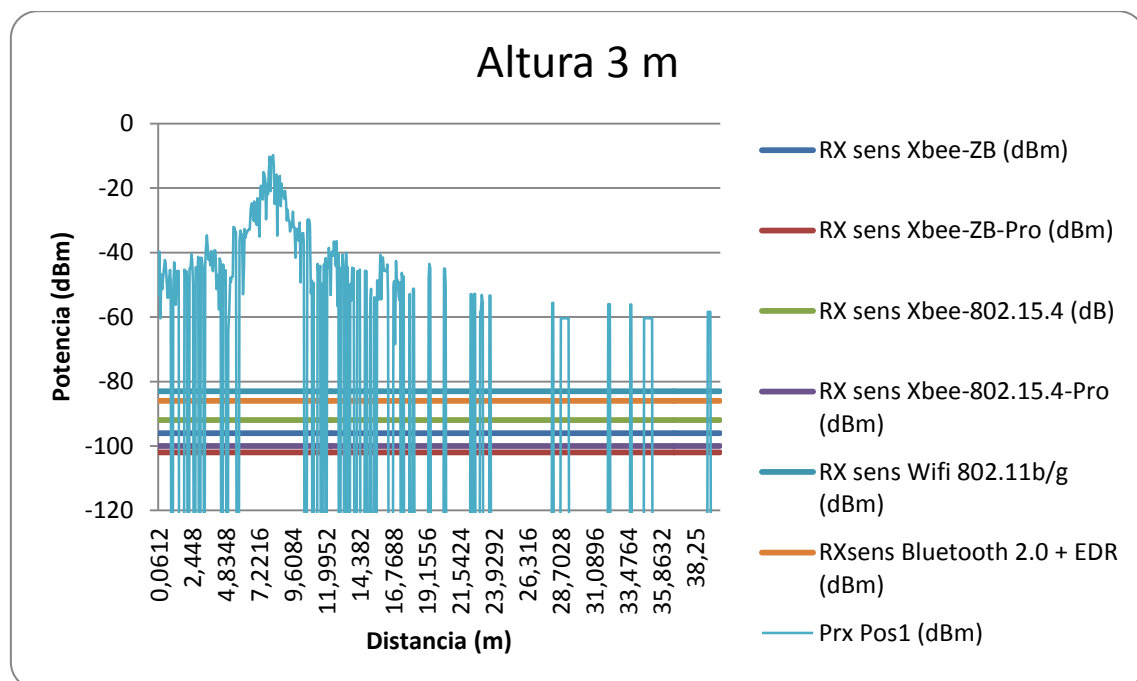


Fig. 53. Situación de los transeceptores sobre la cubierta del vagón para una vista aérea.



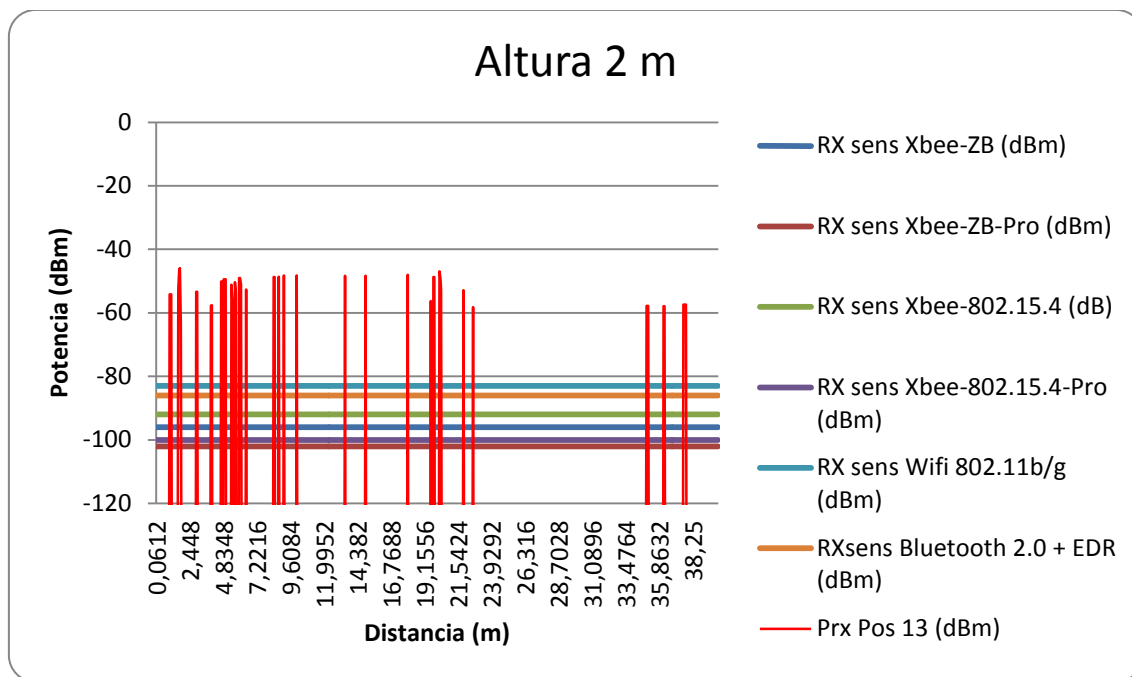


(b)

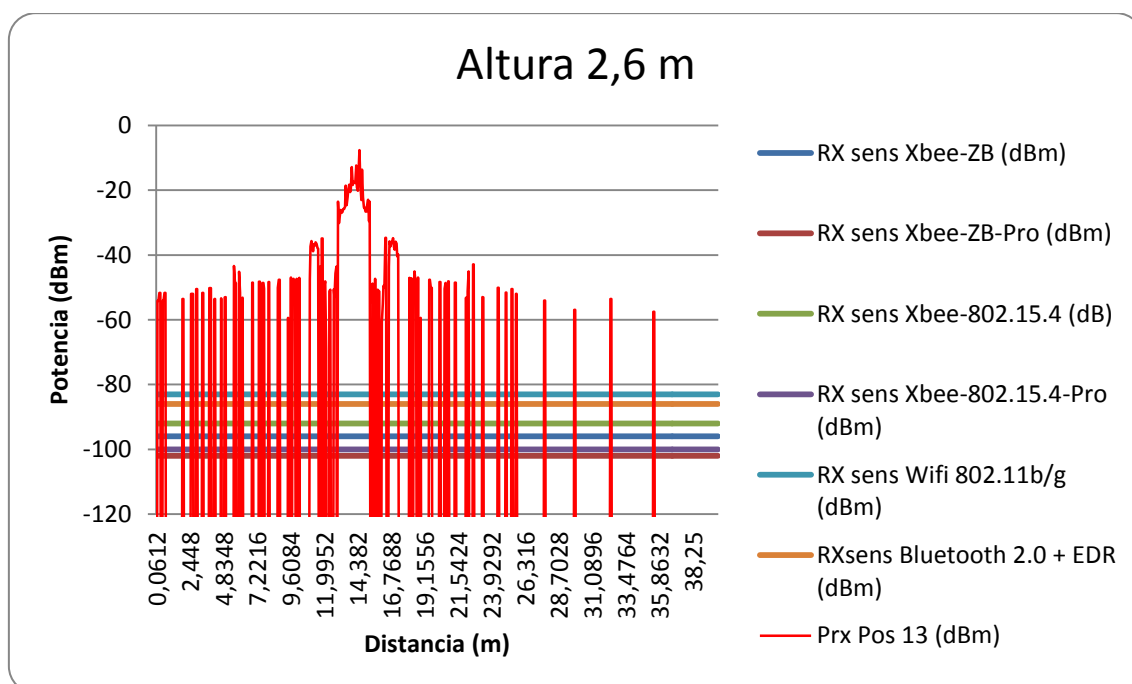


(c)

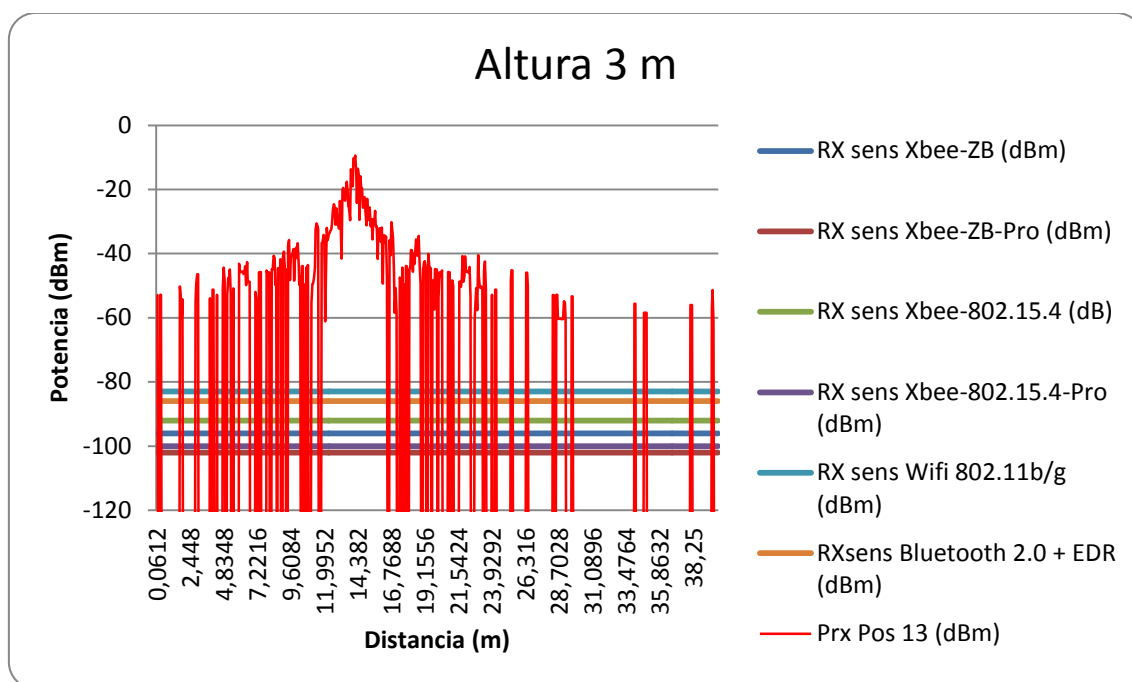
Fig. 54. Potencia recibida (dB) en función de la distancia (m) en las alturas de (a) 2 m, (b) 2.6 m y (c) 3 m de la primera ubicación de los transceptores para su comparación con la sensibilidad de motas de Libelium (protocolos ZigBee, Wifi y Bluetooth).



(a)



(b)



(c)

Fig. 55. Potencia recibida (dB) en función de la distancia (m) en las alturas de (a) 2 m, (b) 2.6 m y (c) 3 m de la décimo tercera ubicación de los transceptores para su comparación con la sensibilidad de motas de Libelium (protocolos ZigBee, Wifi y Bluetooth).

Tal y como se puede apreciar en las gráficas anteriores las radiales obtenidas superan en todos sus picos máximos todas las líneas de sensibilidad establecidas para todas las motas de Libelium (protocolos ZigBee, Wifi y Bluetooth) salvo en los valores nulos.

En este caso, se han puesto como ejemplo dos ubicaciones una en un extremo y otra en la zona media del vagón de mercancías, no obstante esto mismo se cumple para todas las ubicaciones de las antenas. Para mayor detalle, consultar el resto de gráficas que se adjuntan en el “Anexo D. Resultados adicionales”.

Los valores en los que la potencia recibida decae hasta niveles nulos, no serán detectados por las antenas receptoras; mientras que para el resto de valores, no es necesario un aumento de la ganancia de los transceptores, puesto que el sistema cumple con los niveles exigidos.

Por los resultados anteriores, es evidente que si se mantiene el mismo valor de potencia para la antena transmisora, P_T (2 mW) y los mismos valores de ganancia para las antenas transmisora, G_T y receptora G_R de 1.7 dB y 0 dB respectivamente, se debe planificar un sistema en el que haya que colocar más de un transceptor a lo largo de la misma cubierta de cada vagón para evitar el efecto de zonas con niveles de potencia deficientes.

4.2.3 Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeceptores

Para mostrar con mayor detalle la diferencia que existe entre colocar las antenas en una ubicación u otra y así poder observar cómo cambia el entorno radioeléctrico, se van a combinar dos radiales que corresponden con dos ubicaciones diferentes de las antenas (una en un extremo del vagón y otra en el otro extremo) de un mismo plano de altura como se muestra a continuación:

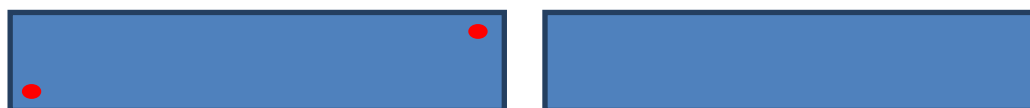


Fig. 56. Situación de los transeceptores sobre la cubierta del vagón para una vista aérea.

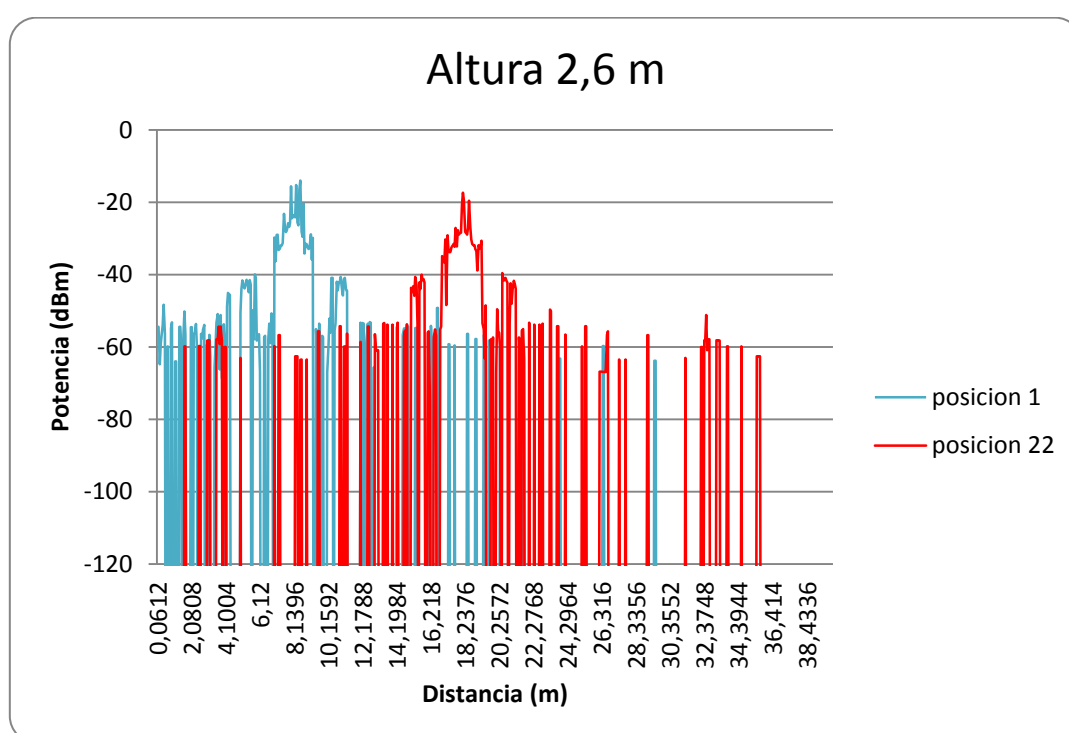


Fig. 57. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) en la altura de 2.6 m para las posiciones vigésimo segunda y primera.

En esta radial comparativa se observa una clara dependencia con la ubicación del transeceptor y el valor de la estimación de potencia recibida, pese a ser un escenario que no presenta elementos adicionales a los propios vagones. Esto es debido al papel que juega la propagación multirrayecto, dado por el carácter metálico de los vagones.

Además, se observa un desplazamiento en el máximo de potencia recibida, por el cambio que se ha realizado en la posición del transeceptor, así como variaciones en la distribución de máximos y mínimos, así como en el valor de potencia máxima. Nuevamente, esto viene dado por la influencia de la propagación multirrayecto en el comportamiento de las pérdidas que sufre el canal radioeléctrico.

En este caso, la separación entre los picos de potencia máxima es bastante considerable, así como también lo es el desplazamiento entre máximos y mínimos debido a la lejanía a la que se distancian las antenas.

En este ejemplo se puede ver un valle característico entre las zonas de máxima potencia, en el que aparecen zonas con niveles de potencia nulos, como muestra el siguiente gráfico si se realiza un zoom al gráfico anterior:

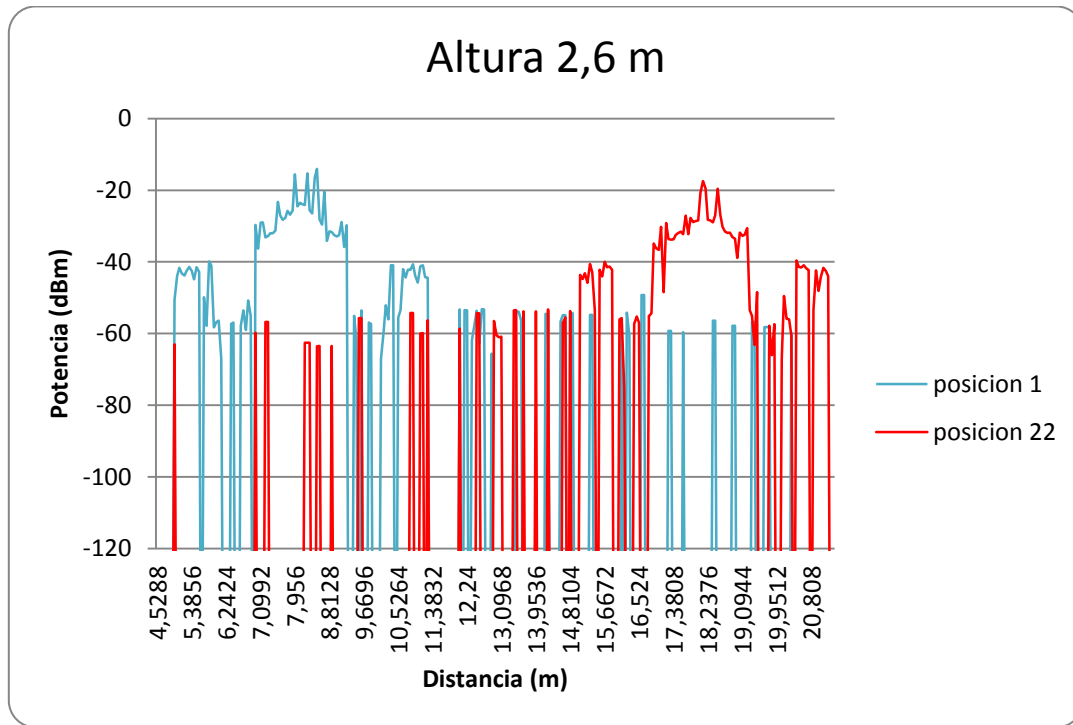
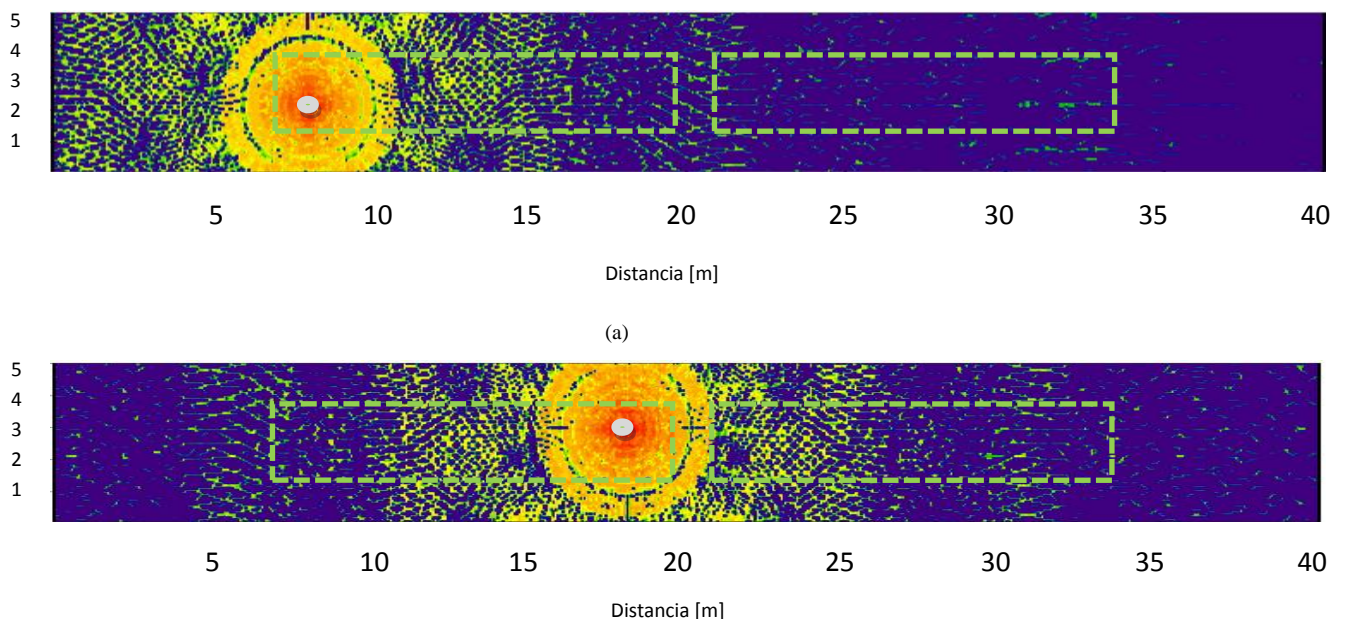


Fig. 58. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) en la altura de 2.6 m para las posiciones vigésimo segunda y primera (zoom realizado a la zona de interés).

Estos resultados se manifiestan de igual manera en los planos bidimensionales de potencia recibida (Figura 59), en los que para una altura en concreto si se contrastan los planos obtenidos, se aprecia una deficiencia de potencia recibida en la zona media de la cubierta del vagón; que se corresponde con la misma zona de la gráfica anterior en la que se observaban niveles de potencia nulos.



(b)

Fig. 59. Comparación entre planos bidimensionales de potencia recibida para las ubicaciones (a) primera y (b) vigésimo segunda de los transeptores para la altura de 3 m.

La clara dependencia con la ubicación de los transeptores también es considerable si se comparan dos radiales pero esta vez de ubicaciones más cercanas entre sí, por ejemplo de un extremo del vagón a una zona intermedia del mismo:



Fig. 60. Situación de los transeptores sobre la cubierta del vagón para una vista aérea.

Se puede apreciar en este caso como hay un solapamiento entre el lóbulo lateral derecho de la primera posición con el lóbulo lateral izquierdo de la otra posición si se realiza un zoom al gráfico como se muestra en la siguiente figura:

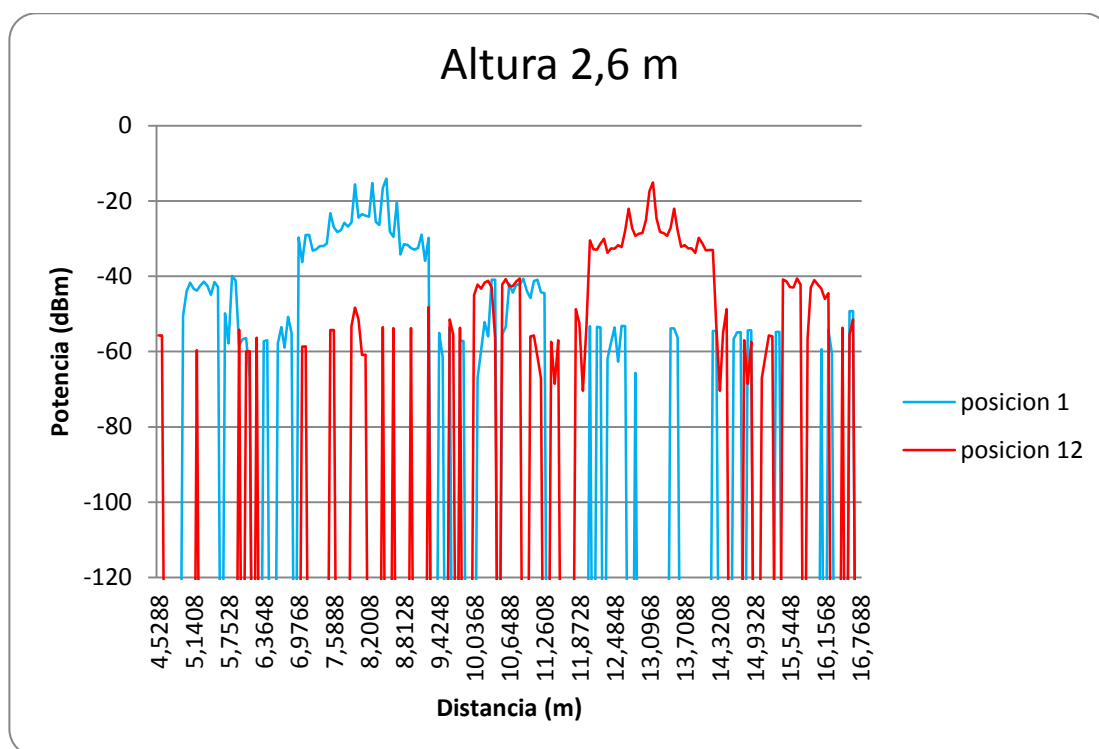


Fig. 61. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) en la altura de 2.6 m para las posiciones décimo segunda y primera (zoom realizado a la zona de interés).

Si ahora se comparan los planos de potencia recibida para un mismo plano de altura como se muestra a continuación (Figura 63), el resultado corrobora lo anterior: las zonas de potencia máxima se unen. No obstante, la parte derecha de la cubierta del vagón no satisface los niveles exigidos ni tampoco el siguiente vagón. Esto se justifica si se amplía el rango de valores del eje x (distancia en m) para la gráfica anterior (Figura 62).

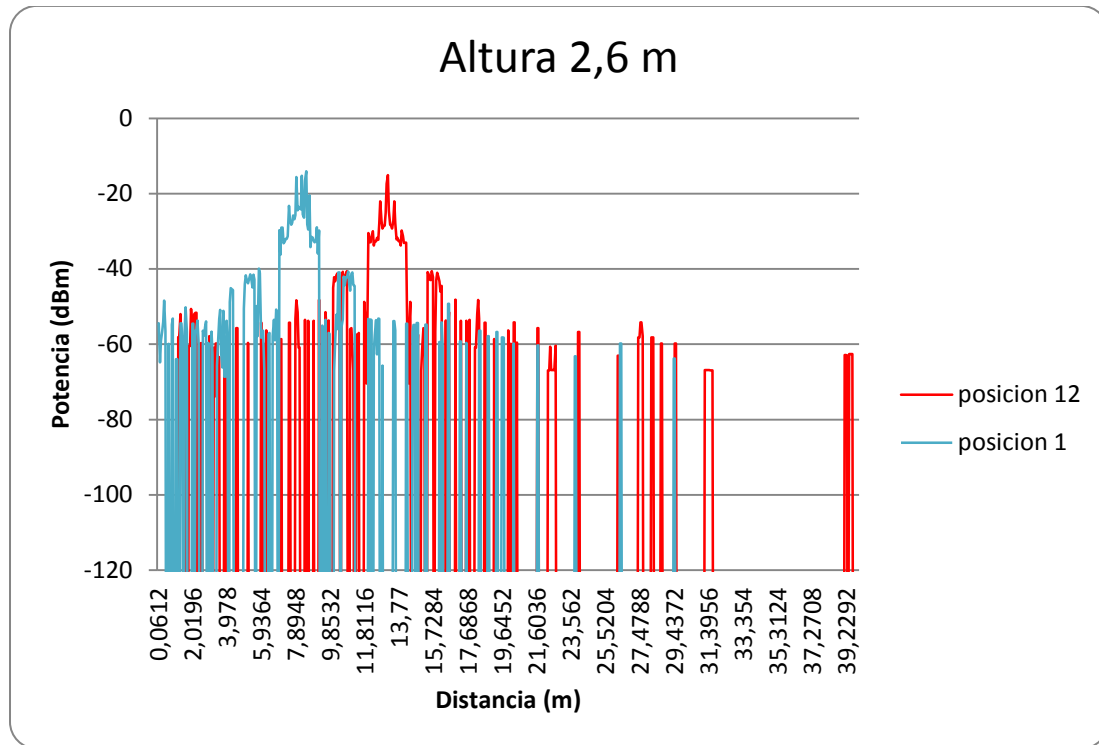


Fig. 62. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) en la altura de 2.6 m para las posiciones décimo segunda y primera.

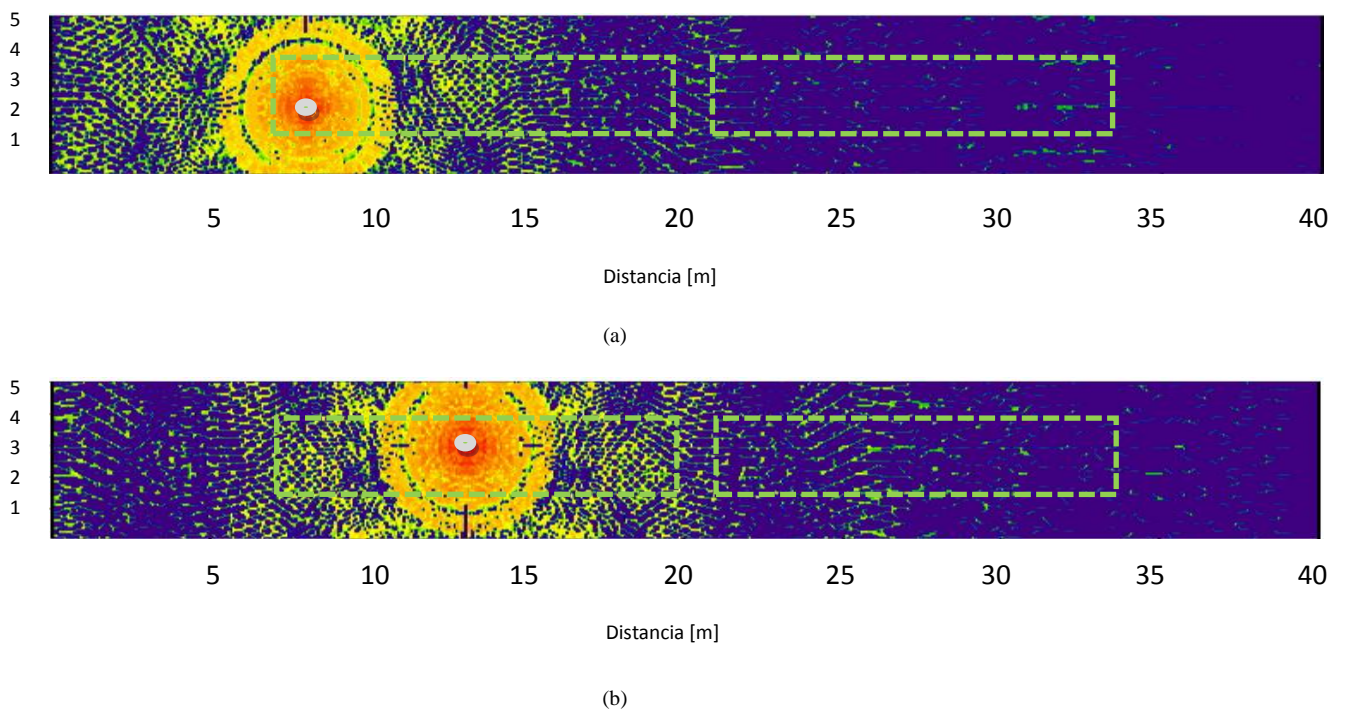


Fig. 63. Comparación entre planos bidimensionales de potencia recibida para las ubicaciones (a) primera y (b) décimo segunda de los transceptores para la altura de 3 m.

El sistema por lo tanto no cubriría con niveles de potencia suficientes toda la cubierta del vagón de mercancías ni tampoco llegaría potencia suficiente al siguiente vagón, aun instalando dos transceptores, ni

con la configuración de la “figura 54” ni con la de la “figura 58” ni con cualquier otra que implicase dos transeceptores.

Es evidente que si ahora se comparan dos ubicaciones para las antenas que estén más próximas que las anteriores, podemos observar como el solapamiento es mucho mayor todavía que para los casos anteriores (Figura 65):



Fig. 64. Situación de los transeceptores sobre la cubierta del vagón para una vista aérea.

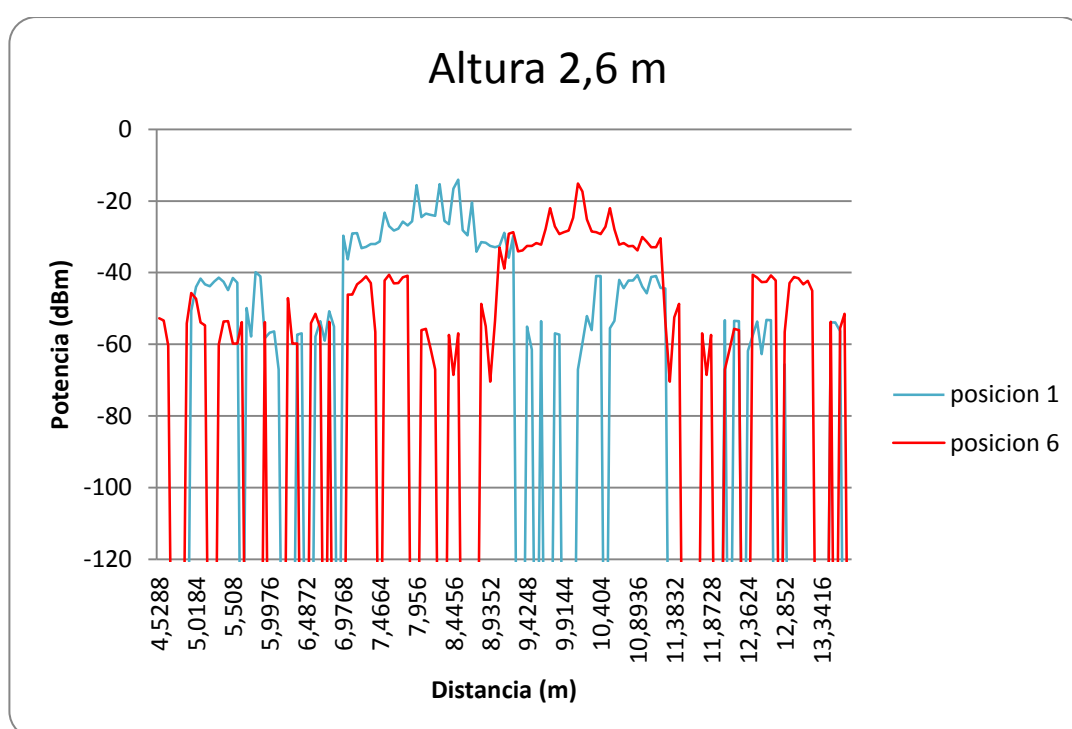


Fig. 65. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) en la altura de 2.6 m para las posiciones sexta y primera.

Para este ejemplo se llega a un punto en cual el lóbulo lateral derecho de la potencia radiada por la primera antena queda prácticamente integrado en el lóbulo principal de potencia de la otra posición de antena y se puede observar la unión de los picos de máxima potencia o lóbulos principales.

Hecho que también se manifiesta en los planos bidimensionales de potencia recibida (Figura 66), por consiguiente no es factible emplear esta configuración a la hora de instalar más de un dispositivo ya que podemos alejar más entre sí ambos transeceptores sin perder la zona de cobertura entre ellos.

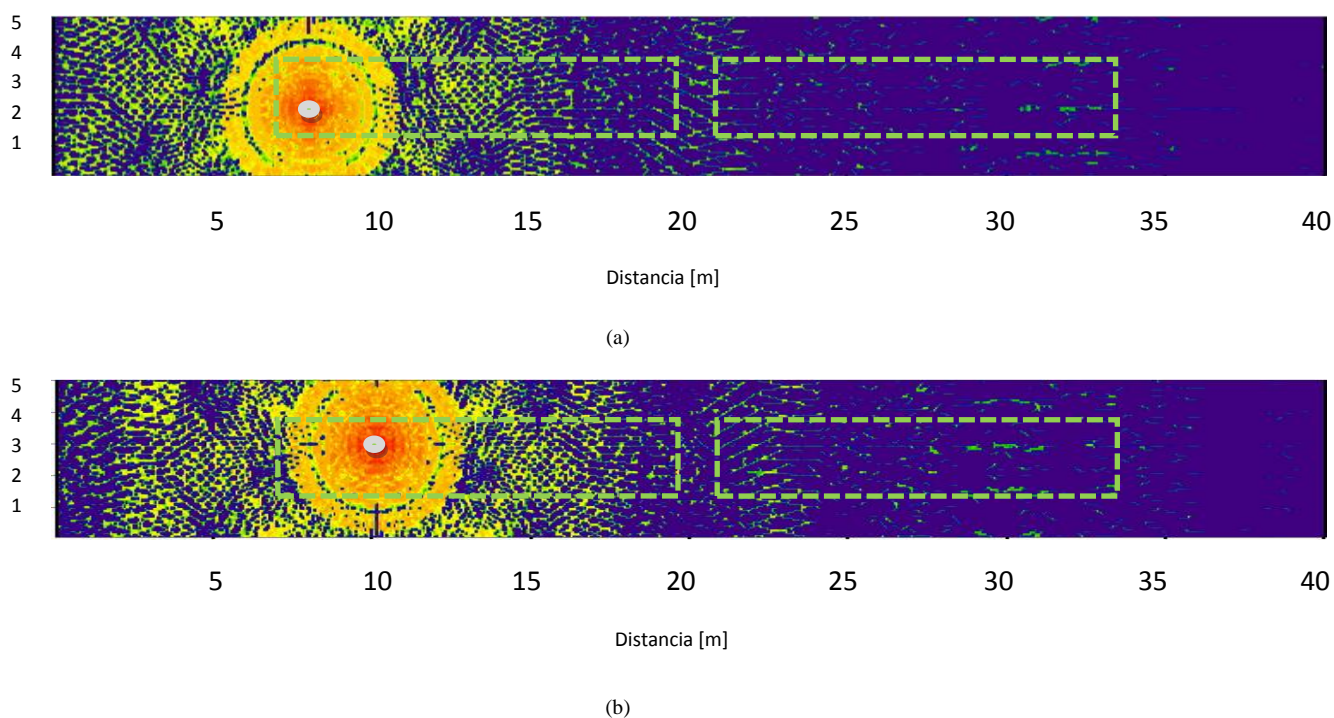


Fig. 66. Comparación entre planos bidimensionales de potencia recibida para las ubicaciones (a) primera y (b) sexta de los transceptores para la altura de 3 m.

Y si la distancia es prácticamente de apenas 1 metro entre las dos antenas, los lóbulos principales quedan prácticamente integrados el uno en el otro tal y como muestra la siguiente gráfica (Figura 68):



Fig. 67. Situación de los transceptores sobre la cubierta del vagón para una vista aérea.

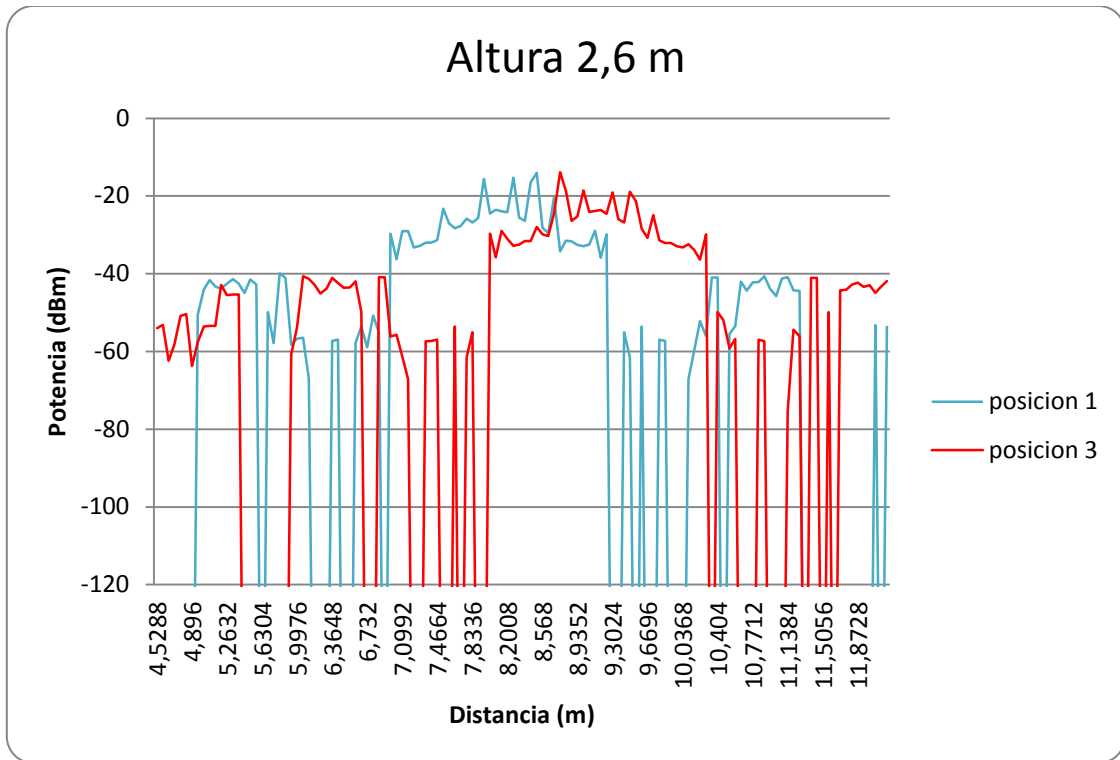


Fig. 68. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) en la altura de 2.6 m para las posiciones tercera y primera.

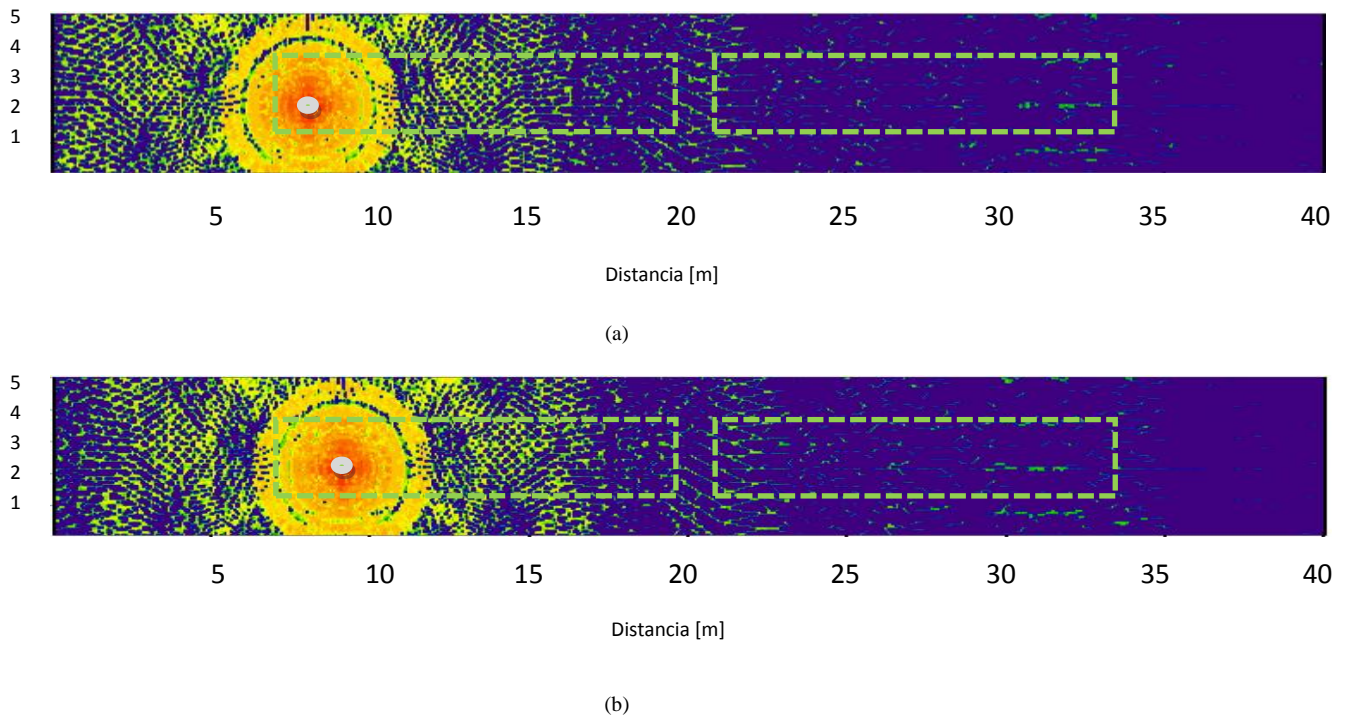


Fig. 69. Comparación entre planos bidimensionales de potencia recibida para las ubicaciones (a) primera y (b) tercera de los transeptores para la altura de 3 m.

Por lo que tampoco es factible emplear esta configuración a la hora de instalar más de un dispositivo al poder alejar a una mayor distancia los dispositivos.

Dicho esto se plantea un sistema radiante que pueda quedar ubicado en la cubierta del vagón, lo que en principio facilita la instalación y en caso necesario, permite la interconexión de vagones más alejados, al tener línea de vista, con al menos tres motas por cada vagón de tren. Una de ellas situada en la zona media del vagón y otras dos situadas en los extremos del mismo.

Dado que existen varias formas de colocar las antenas sobre la cubierta del vagón, a continuación se contrastan los resultados de las diferentes configuraciones que existen para posicionar las tres motas:

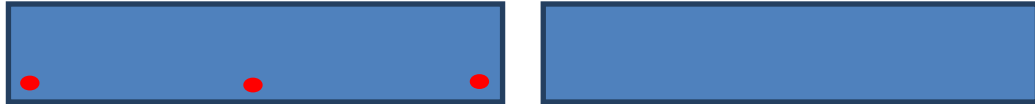


Fig. 70. Situación de los transeceptores sobre la cubierta del vagón para una primera configuración (vista aérea).

En los gráficos siguientes se muestra una comparación para diferentes planos que corresponden a las diferentes ubicaciones de los transeceptores mostradas arriba para la misma altura:

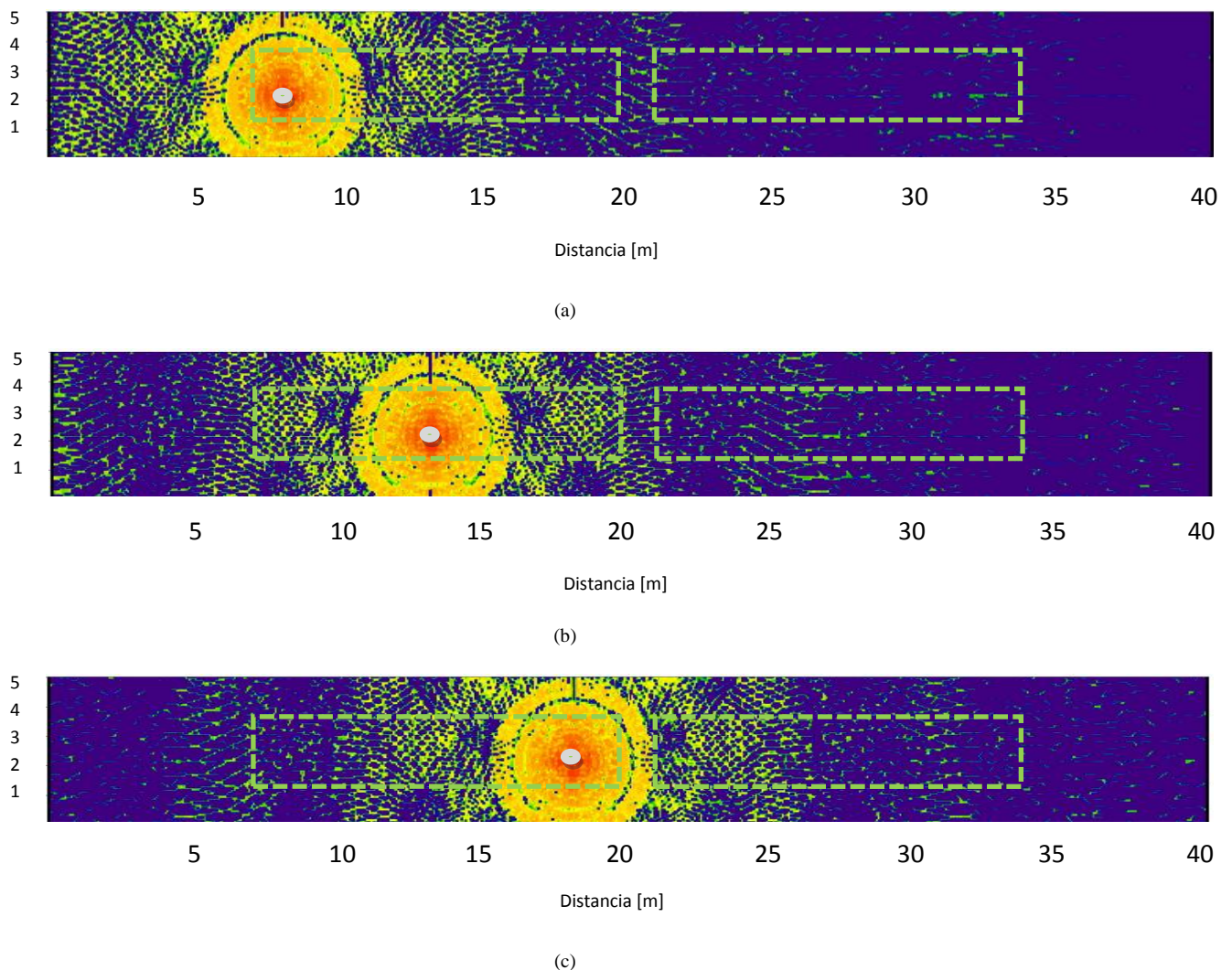


Fig. 71. Comparación entre planos bidimensionales de potencia recibida para las ubicaciones (a) primera (b) décimo primera y (c) vigésimo primera de los transeceptores para la altura de 3 m.

Viendo los planos anteriores se puede comprender como al instalar tres antenas se tiene cubierta toda la cubierta del vagón con potencia suficiente como para proporcionar un rango cobertura adecuada a lo largo del mismo. Esto también queda demostrado si se realiza una comparación entre las radiales de las tres ubicaciones:

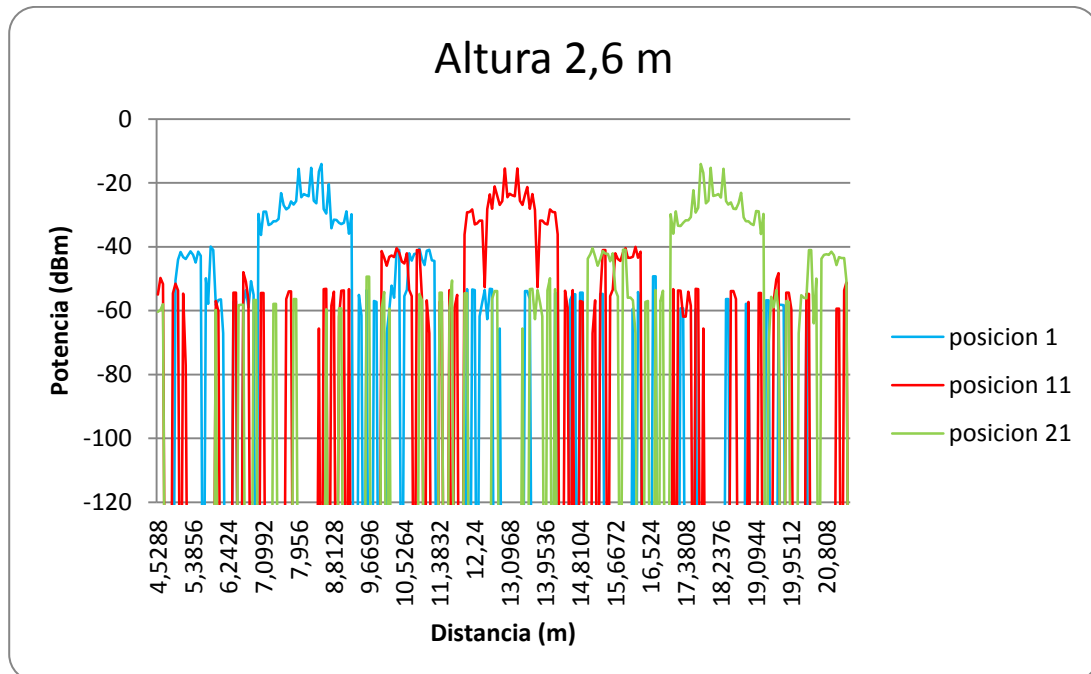


Fig. 72. Comparación entre radiales para las ubicaciones (a) primera (b) décimo primera y (c) vigésimo primera de los transceptores para la altura de 2.6 m.

Se realiza el mismo análisis para la segunda configuración:

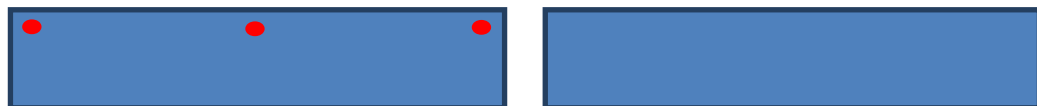
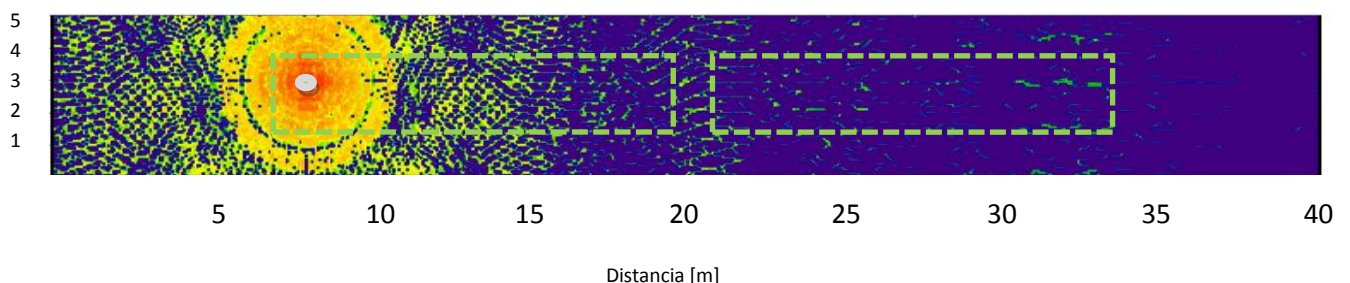


Fig. 73. Situación de los transceptores sobre la cubierta del vagón para una segunda configuración (vista aérea).



(a)

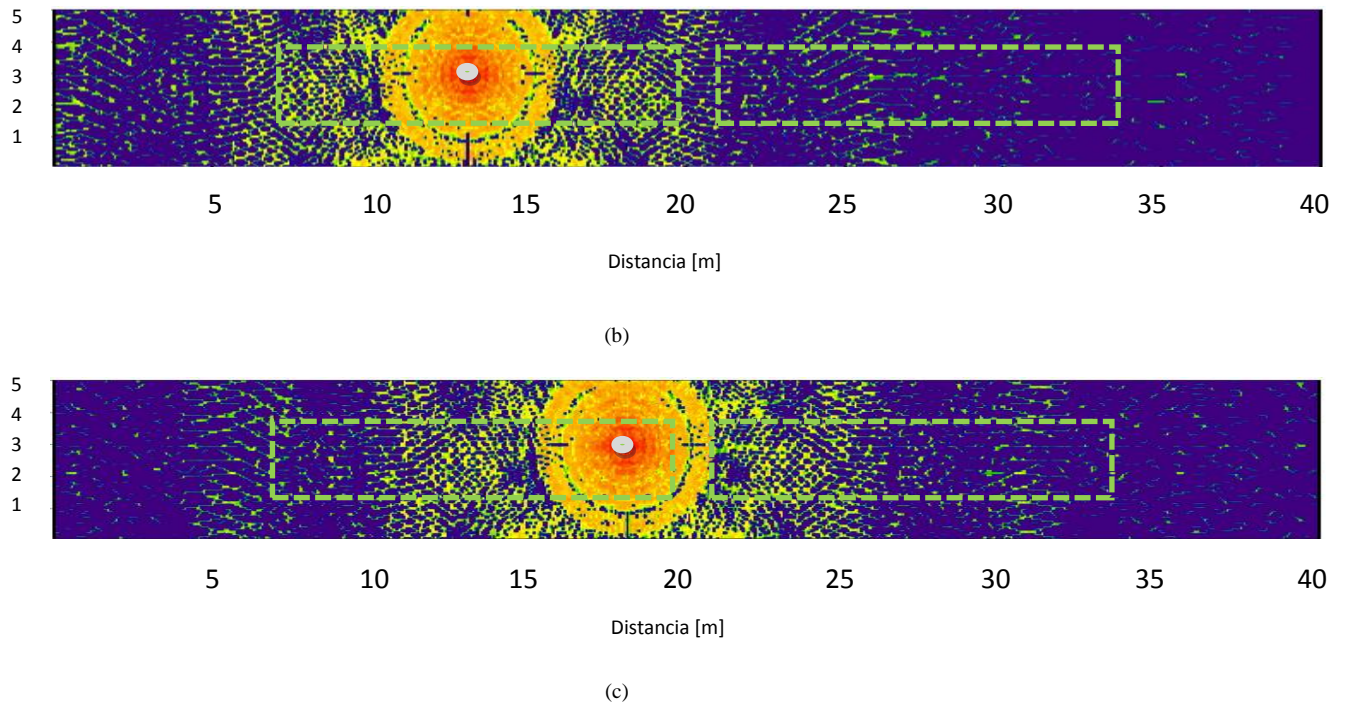


Fig. 74. Comparación entre planos bidimensionales de potencia recibida para las ubicaciones (a) segunda (b) décimo segunda y (c) vigésimo segunda de los transeptores para la altura de 3 m.

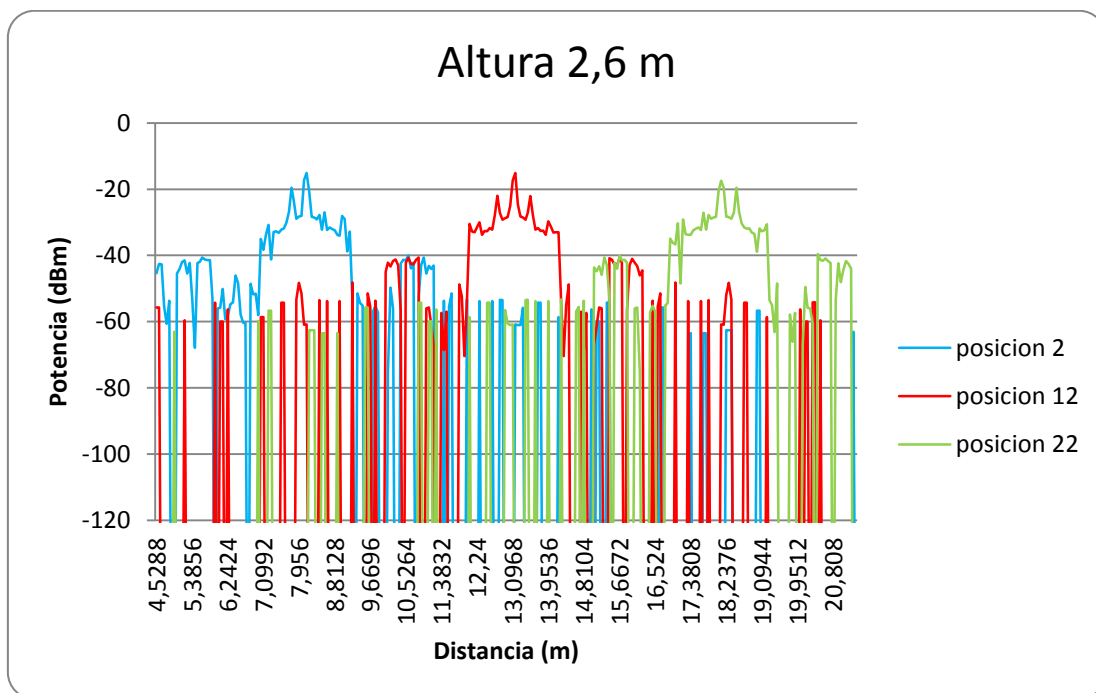


Fig. 75. Comparación entre radiales para las ubicaciones (a) segunda (b) décimo segunda y (c) vigésimo segunda de los transeptores para la altura de 2.6 m.

Lo mismo para la tercera configuración:

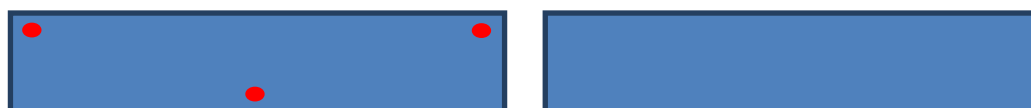
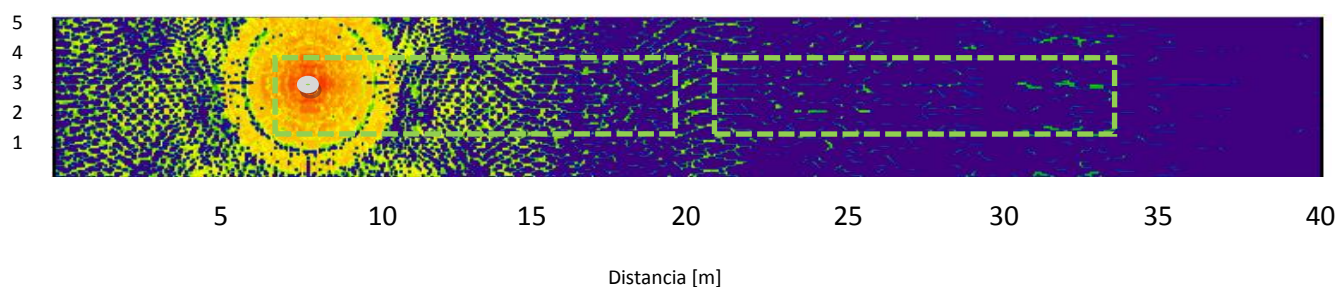
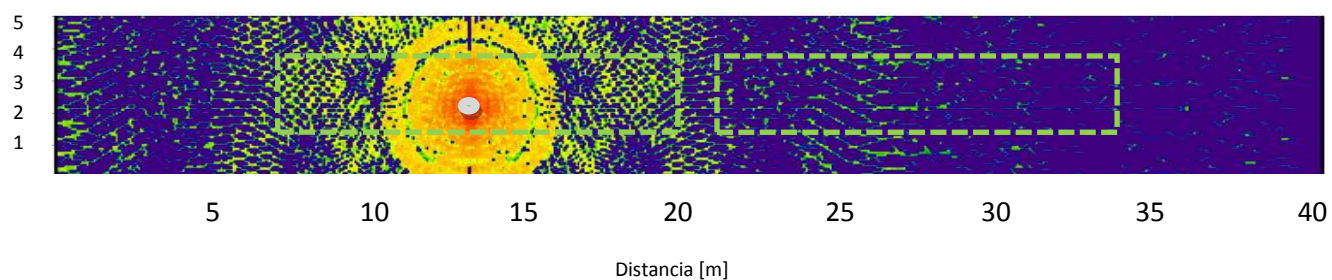


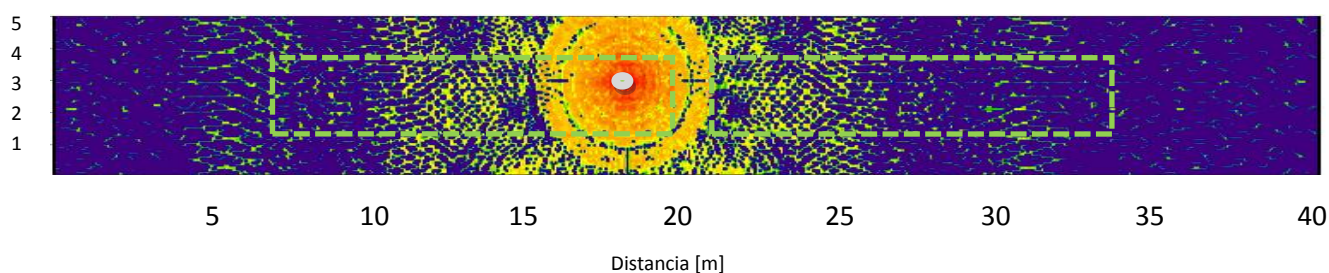
Fig. 76. Situación de los transceptores sobre la cubierta del vagón para una tercera configuración (vista aérea).



(a)



(b)



(c)

Fig. 77. Comparación entre planos bidimensionales de potencia recibida para las ubicaciones (a) segunda (b) décimo primera y (c) vigésimo segunda de los transceptores para la altura de 3 m.

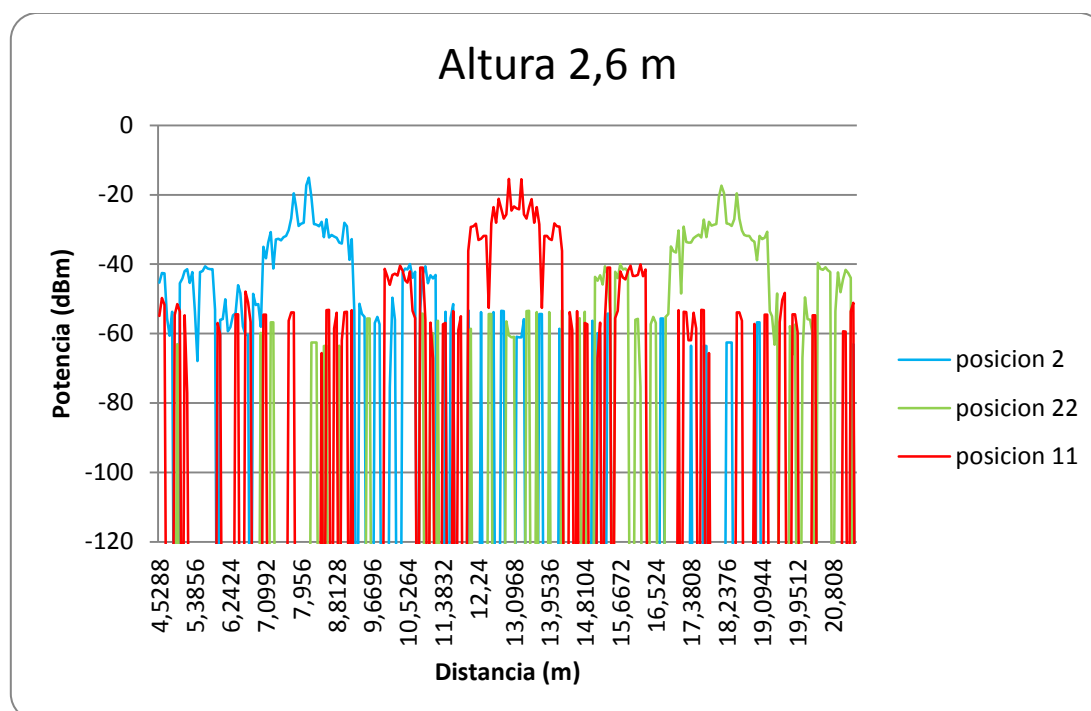


Fig. 78. Comparación entre radiales para las ubicaciones (a) segunda (b) décimo primera y (c) vigésimo segunda de los transceptores para la altura de 2.6 m.

Y para la última configuración:

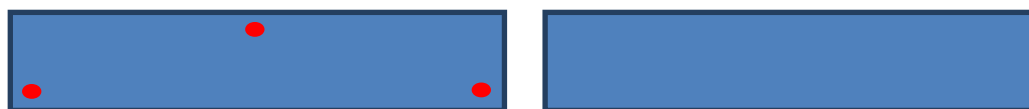
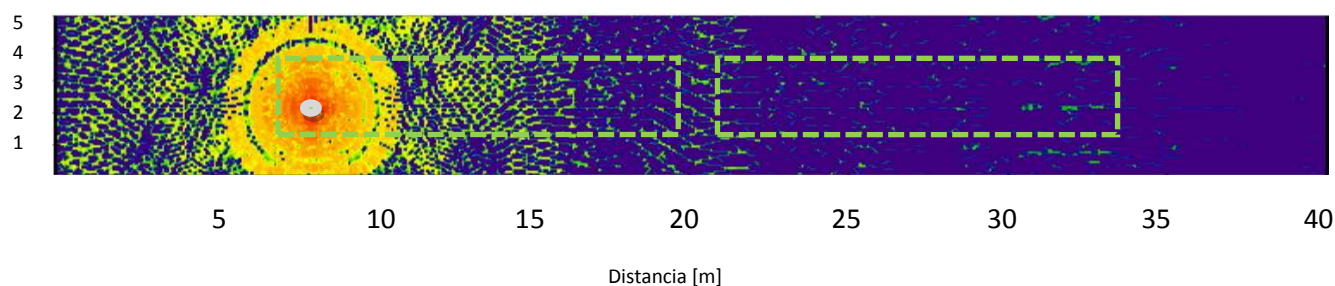
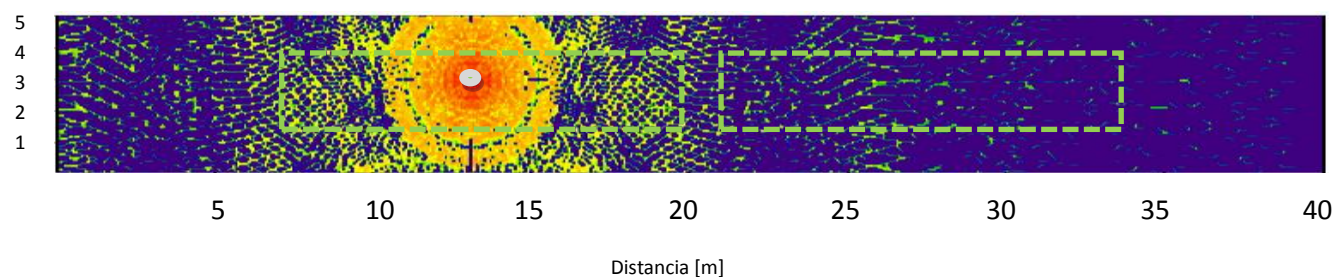


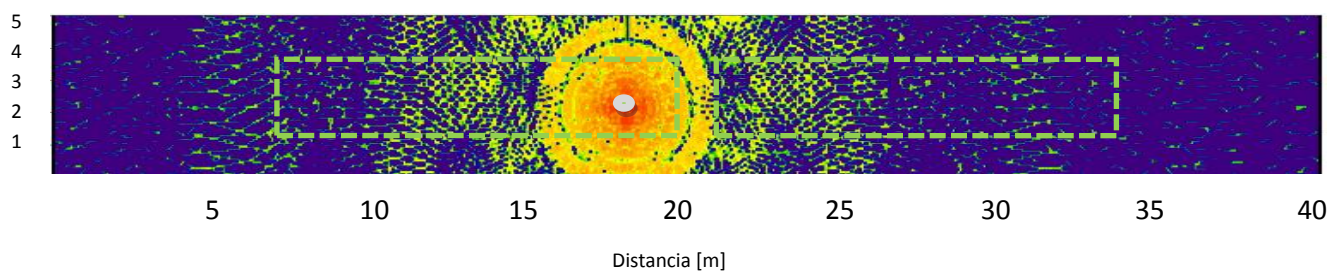
Fig. 79. Situación de los transceptores sobre la cubierta del vagón para una cuarta configuración (vista aérea).



(a)



(b)



(c)

Fig. 80. Comparación entre planos bidimensionales de potencia recibida para las ubicaciones (a) primera (b) décimo segunda y (c) vigésimo primera de los transeceptores para la altura de 3 m.

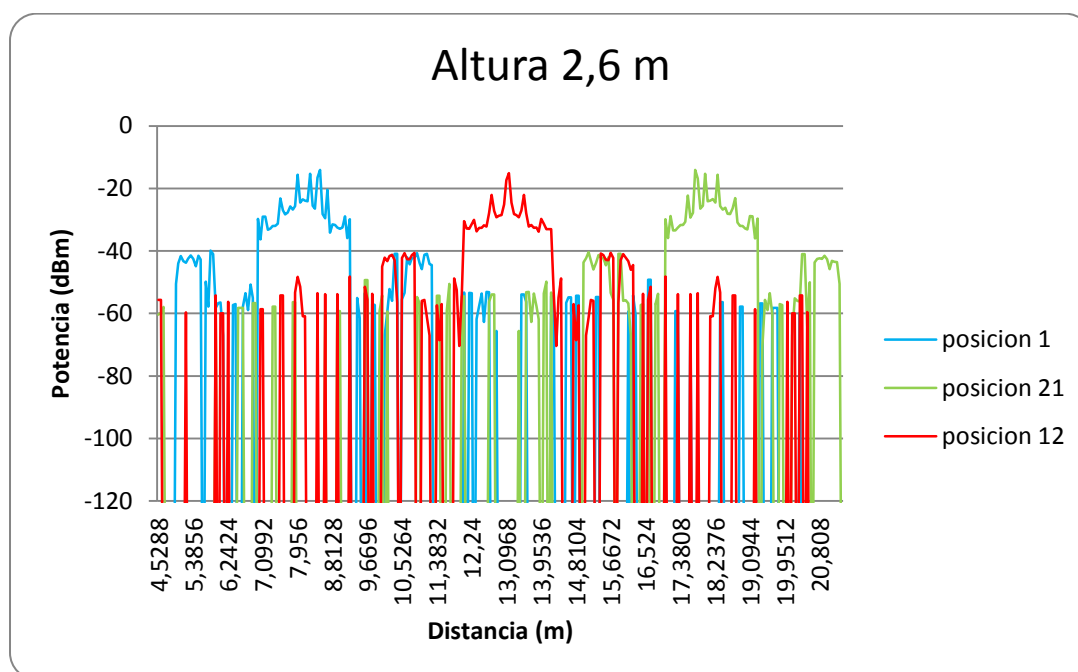
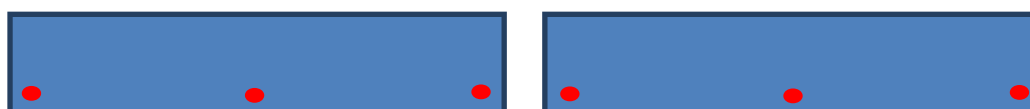
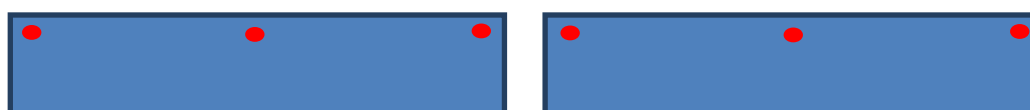


Fig. 81. Comparación entre radiales para las ubicaciones (a) primera (b) décimo segunda y (c) vigésimo primera de los transeceptores para la altura de 2.6 m.

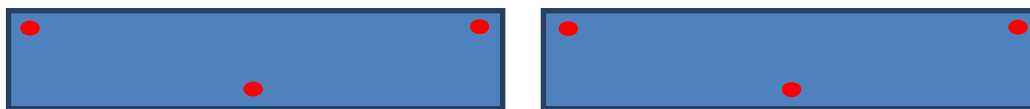
Según lo anterior, las radiales muestran resultados similares para las cuatro configuraciones, por tanto cualquiera de ellas sería válida garantizándose cobertura a lo largo de la cubierta del mismo vagón y del siguiente instalando tres motas por cada vagón de mercancías como muestran las siguientes figuras:



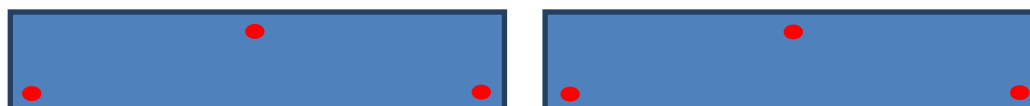
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 82. Situación de los transceptores sobre la cubierta del vagón para distintas configuraciones todas ellas válidas (vista aérea).

CAPÍTULO V

Conclusiones y líneas futuras.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este trabajo, se ha analizado la dependencia con la posición de la respuesta del canal radioeléctrico en el caso de interconexión de vagones de tren.

Mediante el empleo del algoritmo basado en lanzamiento de rayos 3D, se puede analizar la respuesta para diferentes ubicaciones de transceptores en el techo de los vagones, particularizado para el caso de intercomunicación entre dos vagones.

Tanto los resultados de potencia recibida como los valores de perfiles de retardo potencia muestran dicha dependencia topológica, fuertemente determinada por las componentes de propagación multirrayecto presentes.

Estos resultados pueden servir para establecer la correcta planificación radioeléctrica de la red de sensores, optimizando así la ubicación de los mismos en el caso general de N vagones, con el fin de obtener el valor adecuado de potencia recibida frente a sensibilidad y minimizar el consumo energético.

La solución que finalmente se ha adoptado, instalando tres motas por cada vagón de mercancías, ha sido consecuencia directa de los parámetros de simulación escogidos. Se ha buscado la mejor solución posible frente al problema que se ha planteado.

Al utilizar motas de baja potencia de transmisión, (recordar que se han utilizado motas de 2 mW) implica que el consumo energético se minimice, debido al reducido consumo de sus baterías, al mismo tiempo que se obtienen los valores adecuados frente a sensibilidad como se ha demostrado y todo ello con un bajo coste.

Un estudio posterior al este proyecto, puede ser el análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario si se emplean motas con mayor potencia de transmisión, en este caso el comportamiento del sistema será diferente y puede ser que sea necesaria la implantación de tan solo uno o dos transceptores por vagón.

Así como también trasladar lo que se ha analizado aquí al caso general de N vagones como se ha comentado más arriba. En este caso particular, habrá que tener en cuenta otros factores como por ejemplo la curvatura que pueda mostrar el tren al realizar un giro, lo que tiene una repercusión directa en la forma de posicionar las antenas.

CAPÍTULO VI

Agradecimientos.

6 AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer al proyecto INNPACTO-RAILTRACE para el desarrollo del trabajo presentado.

CAPÍTULO VII

Bibliografía.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Farahani, S. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Newnes, 2008.
- [2] <http://www.contrenrenfe.com/40box.html>
- [3] Iskander, M.F. and Yun, Z., “Propagation Prediction Models for Wireless Communications Systems”.
- [4] Microwave Theory and Techniques, IEEE Transaction on, vol. 50, nº3, pp. 662-673, March 2002.
- [5] Saez de Adana, F. and Blanco, G. and Diego, G. and Arriaga, P. and Cátedra, M. F., “*Propagation Model Based on Ray Tracing for the Design of Personal Communication Systems in Indoor Environments*” Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 49, no 6, pp. 2105-2112, November 2000 .
- [6] <http://www.libelium.com/products/waspmote>
- [7] http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo3.pdf
- [8] <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifiintro.php3>
- [9] <http://es.scribd.com/doc/74219028/35/Metodos-empiricos-de-prediccion-de-propagacion>
- [10] http://www.alamys.org/documentos/seminarios_2005/senalizacion_ciditrans_antigua/07Jueves/36_Tren%20Tierra_JMartinez.pdf
- [11] Muñiz Aza, José María y Reviriego, Víctor (2006): *Las telecomunicaciones en el ferrocarril*, en “De las señales de humo a la sociedad del conocimiento. 150 años de telecomunicaciones en España”, ed. Foro histórico de las telecomunicaciones.
- [12] Zarcero Muñoz, Gregorio (2006): Experiencias en la construcción de redes GSM-R en las líneas de alta velocidad de ADIF. Bit, nº157, junio-julio 2006.
- [13] José María Hernando Rábanos. Transmisión por radio. Editorial universitaria Ramón Areces, 5º edition, 2006.

ANEXO A

Publicaciones URSI Elche XXVII Symposium Nacional 2012

Caracterización del Canal Radioeléctrico Aplicado a la Interconexión de Vagones de Tren.

Víctor Garrido Calvo⁽¹⁾, Tomás Cantabrana Martínez⁽¹⁾, Leyre Azpilicueta⁽¹⁾, José Javier Astráin⁽²⁾, Jesús Villadangos⁽²⁾, Francisco Falcone⁽¹⁾,

garrido.58222@e.unavarra.es, cantabrana.57715@e.unavarra.es, leyre.azpilicueta@unavarra.es,
josej.astrain@unavarra.es, jesuv@unavarra.es, francisco.falcone@unavarra.es

⁽¹⁾ Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra.

⁽²⁾ Dpto. de Ingeniería Matemática e Informática, Universidad Pública de Navarra.

Abstract- In this work, modeling of the wireless channel in order to communicate train wagons is analyzed. Due to the large size and the metallic nature of the train wagons, coupling to surface waves as well as strong multipath fading is present. Optimal position of low power wireless transceivers is obtained with the aid of an in-house 3D ray launching code, by estimation of bi-dimensional received power maps as well as power delay profiles in the 2.4 GHz band. These results can aid in the optimal deployment of low cost and low power consumption wireless sensor networks, of application in railway logistics.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el sector ferroviario ha ido retrocediendo en el ranking de medios de transporte de merca perdiendo la partida con el transporte por carretera, que hoy en día ostenta una clara posición de supremacía. En este se han desarrollado iniciativas con el fin de poder potenciar el uso de la red de ferroviaria para el transporte de mercar dado el potencial que presenta desde el punto de vista de eficiencia de coste como de tiempo. Uno de los grandes retos de poder llevar a cabo una gestión integral logístico, controlando la trazabilidad de las mercancías, tanto por part operador ferroviario, como por los agentes logísticos y por el cliente final. En este sentido, juegan un papel fundament tecnologías inalámbricas, dado que posibilita interacción de manera ubicua con la mercancía transportada en todo mome

Es factible el uso de diversos tipos de sistemas y tecnologías inalámbricos para poder llevar a cabo dicho proceso de trazabilidad. Tradicionalmente, las comunicaciones ferroviarias se han apoyado en redes móviles, tanto en las PLMN basadas en GSM/UMTS como en redes más específicas del sector ferroviario, como es el caso de GSM-R y en algunos casos, sistemas de trunking digital como TETRA. Dicha funcionalidad, básica de comunicación entre el tren en su conjunto y la infraestructura de comunicaciones, se puede ver complementada por el empleo de redes tanto WLAN para intercomunicación con la infraestructura ferroviaria, como redes WPAN para intercomunicación entre vagones o en el interior de los mismos.

A la hora de poder evaluar el empleo de este tipo de tecnologías en el entorno ferroviario, es necesario considerar el comportamiento del canal radioeléctrico en las condiciones particulares de funcionamiento del mismo. En este trabajo, se analiza el comportamiento de dicho canal para el caso de intercomunicar vagones de tren entre ellos, mediante el empleo de un sistema WPAN (tal como ZigBee o Bluetooth) [1]. El motivo de dicha elección es poder implementar un sistema de bajo coste y bajo consumo energético, considerando que para operativa de telecontrol y telemando es factible contar con un ancho de banda moderado [1].

Se presentará el análisis del canal radioeléctrico aplicable al sistema ZigBee para la interconexión entre vagones y/o con la locomotora o vagón principal. Cada vagón contará con un nodo ZigBee que tendrá información referente al contenedor y a las mercancías que viajen en su interior. Esta información se irá transmitiendo entre los vagones hasta que llegue a la locomotora o a un vagón principal que tenga capacidad de comunicación con el exterior, para ser enviada al destino final del mismo.

II. DEFINICIÓN DEL ESCENARIO Y METODOLOGÍA DE MEDIDA

El escenario de partida a considerar es la interconexión mediante el empleo de motas ZigBee de un conjunto de vagones de tren. Dichos vagones son en principio homogéneos y el objetivo de la cadena de comunicación establecida es poder ofrecer un medio de transporte tanto para elementos de información generados en el interior de los vagones como para la intercomunicación general de datos a lo largo de todo el tren. Las dimensiones de los vagones que se han considerado son las medidas reales de los trenes de mercancías que utiliza Renfe [2]. Sus dimensiones externas son 12,16/2,44/2,60 m (Largo/Ancho/Alto) y sus dimensiones internas son 12,05/2,32/2,32 m (Largo/Ancho/Alto).

En función de esto se calculó el grosor de cada una de las paredes que conforman cada vagón, siendo éste de 5,5 cm para la pared frontal y trasera, 6 cm para las paredes laterales y 14 cm para el techo y el suelo. La estructura de dicho escenario así como el detalle de la interconexión de dos vagones se muestra en la figura 83:

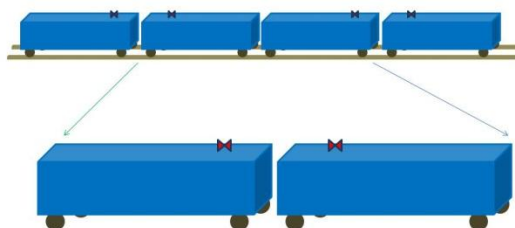


Fig. 83. Representación esquemática de la interconexión entre vagones de tren.

Cabe destacar que desde el punto de vista radioeléctrico, el escenario presenta la particularidad de operar en un recinto abierto, con un gran contenido metálico, propio de los contenedores de mercancías. La estimación de pérdidas de radiopropagación, debido precisamente a dicho entorno, se realizará mediante el método determinista de trazado de rayos [3-4]. En concreto, se utilizará un algoritmo de lanzamiento de rayos en 3 dimensiones implementado en *Matlab* en la Universidad Pública de Navarra. Dicho código tiene en cuenta los procesos de reflexión, refracción y difracción de primer orden, así como las propiedades de los materiales que hay en el escenario en términos de su constante dieléctrica y su tangente de pérdidas. La ventaja de utilizar esta metodología radica en el compromiso de obtener resultados de alta precisión sin tener que recurrir a largos tiempos de cálculos.

III. CARACTERIZACIÓN DEL CANAL RADIOELÉCTRICO

El análisis del comportamiento radioeléctrico parte de la necesidad de interconexión de los vagones. En este sentido, se considera inicialmente una configuración de sistema radiante que pueda quedar ubicada en la cubierta del vagón, lo que en principio facilita la instalación y en caso necesario, permite la interconexión de vagones más alejados, al tener línea de vista. De esta manera, se define una retícula sobre el techo del vagón con un total de veintidós posiciones en las que se propone la ubicación de los transceptores, tal y como muestra la figura 84:



Fig. 84. Cuadrícula que muestra las diferentes posiciones de antena que hay que considerar sobre el techo del vagón.

Considerando como elemento radiante monopolos verticales cortos con una potencia de transmisión de 2mW [5] se han realizado los cálculos mediante el empleo del código de lanzamiento de rayos 3D. Los parámetros de simulación empleados han sido cuboides de 6 cm, incremento de ϕ y θ de $\pi/90$, número de rebotes igual a 5 y frecuencia de operación de 2.4 GHz con tasa de transmisión de 250 Kbps. La antena utilizada es omnidireccional con polarización lineal vertical y 1.7 dB de ganancia.

Las siguientes gráficas muestran los resultados de potencia recibida en todo el volumen del escenario de simulación, que se han particularizado para dos posiciones de transceptores (Figura 85):

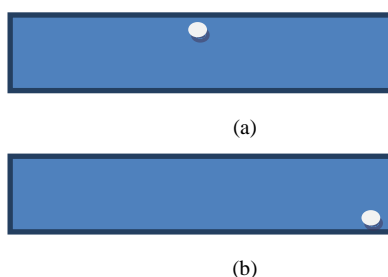


Fig. 85. Representación esquemática de la primera ubicación de antena considerada (coordenadas del escenario 13,10/2,90/2,70 m en Largo/Ancho/Alto) ubicada en la parte central del vagón (a) y la segunda ubicación considerada (coordenadas del escenario 18,10/2,10/2,70 m en Largo/Ancho/Alto) ubicada en un lateral del vagón (b) para una vista de planta.

Los resultados obtenidos para la estimación de potencia recibida sobre la referencia del techo del vagón se muestran en la Figura 4 para diferentes planos de altura, alturas que se han elegido de forma aleatoria por debajo y por encima de la antena transmisora, como se podían haber elegido otros planos de altura diferentes y que no van a tener incidencias en la caracterización del canal radioeléctrico.

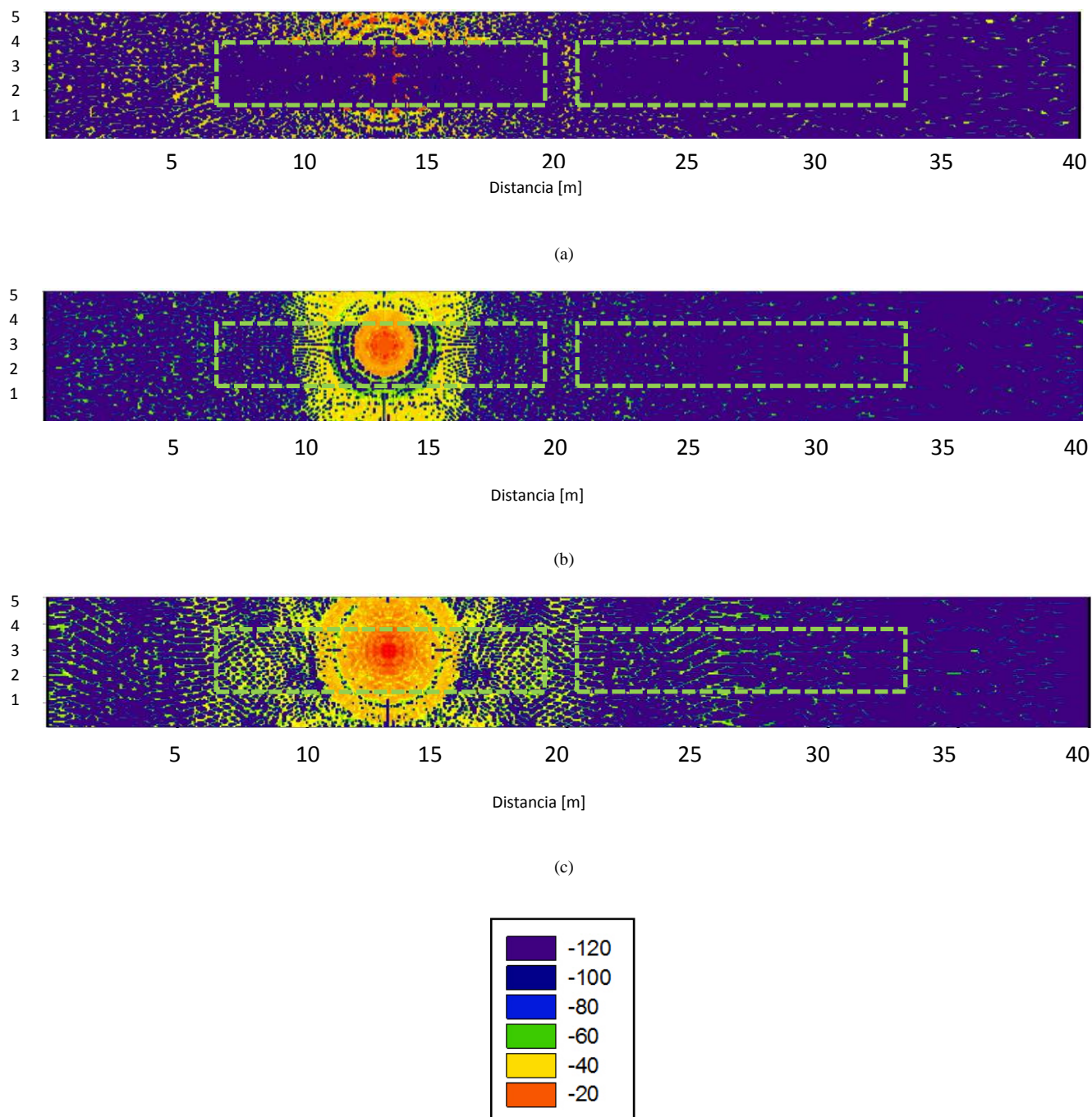


Fig. 86. Potencia recibida (dBm) para la altura de (a) 2 m, (b) 2.6m y (c) 3m.

De manera análoga, se han obtenido los resultados para el segundo caso, en el que la antena se sitúa en un lateral del vagón:

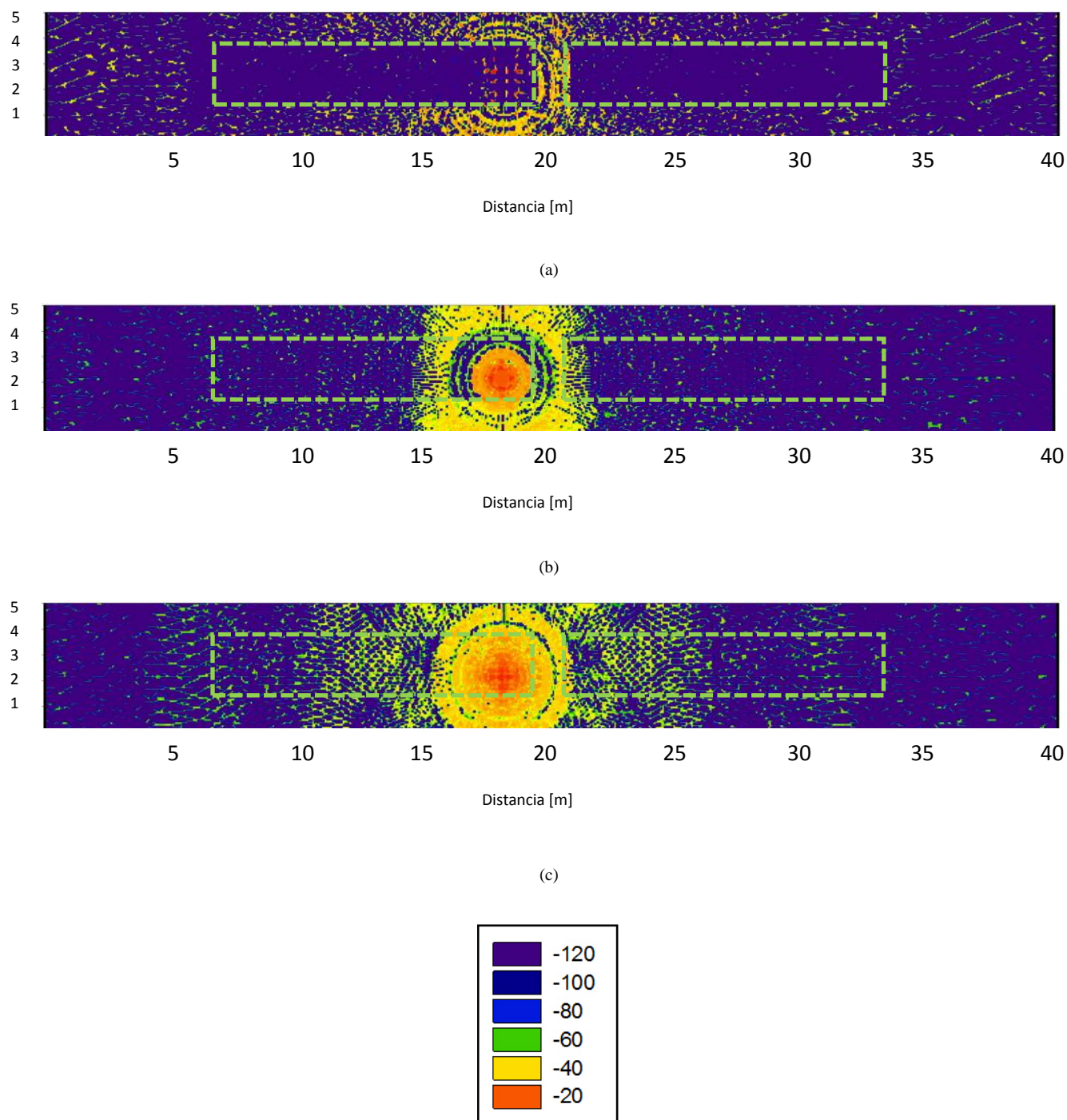


Fig. 87. Potencia recibida (dBm) para la altura de (a) 2 m, (b) 2.6 m y (c) 3 m.

Con el fin de poder obtener una estimación cuantitativa del comportamiento del canal radioeléctrico, se han obtenido curvas de potencia en función de la distancia, en forma de radiales para todo el volumen del escenario de simulación, es decir, la radial abarca un corte en horizontal a media altura del plano desde el principio hasta el final del mismo. Dichos resultados, para diversos planos de altura y para los dos casos de posición de transceptores se presentan en la figura 88 y 89:

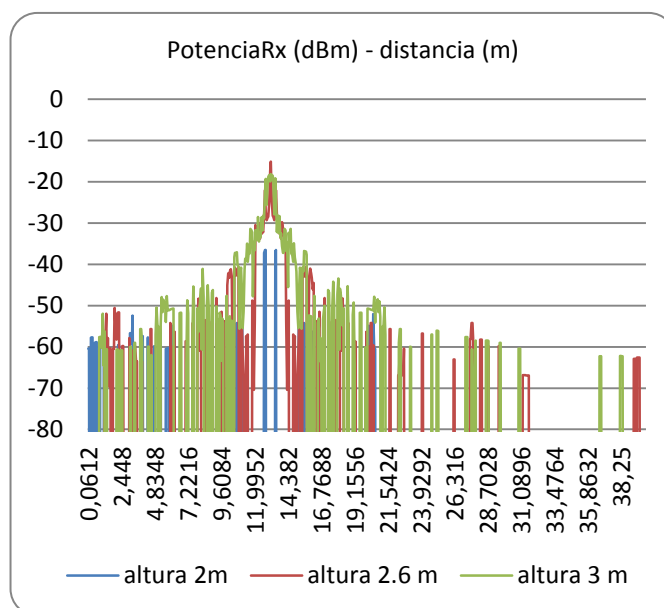


Fig. 88. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) para las diferentes alturas del primer ejemplo.

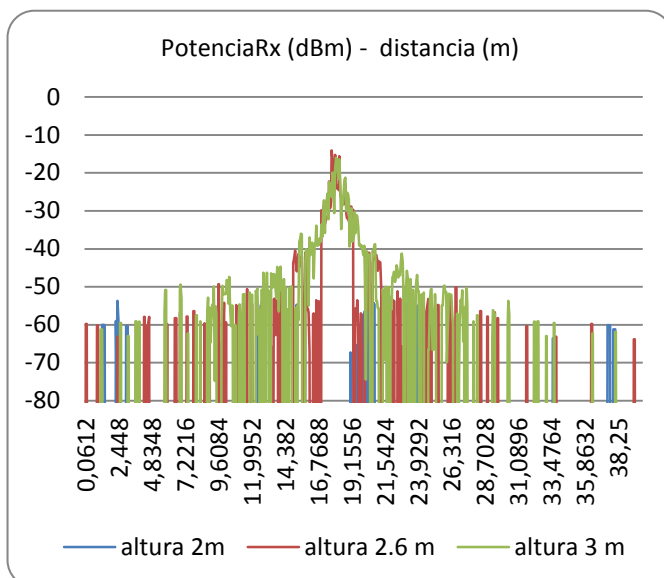


Fig. 89. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) para las diferentes alturas del segundo ejemplo.

Tanto en las gráficas de distribución de potencia como en las radiales mostradas posteriormente, se puede observar una clara dependencia con la ubicación del transceptor y el valor de la estimación de potencia recibida, pese a ser un escenario que no presenta elementos adicionales al propio vagón. Esto es debido al papel que juega la propagación multirayecto, dado por el carácter metálico de los vagones. Nótese también que las curvas no son continuas, debido a la aparición de nulos, zonas en las que la potencia recibida decae hasta niveles mínimos. Esto también es debido a la propagación multirayecto que experimenta el canal.

En la Figura 8 se comparan ambos radiales de potencia recibida, para las dos posiciones (central y lateral). Se observa un desplazamiento en el máximo de potencia recibida, por el desplazamiento que se ha realizado en la posición del transceptor, así como variaciones en la distribución de máximos y mínimos, así como en el valor de potencia máxima. Nuevamente, esto viene dado por la influencia de la propagación multirayecto en el comportamiento de las pérdidas que sufre el canal radioeléctrico.

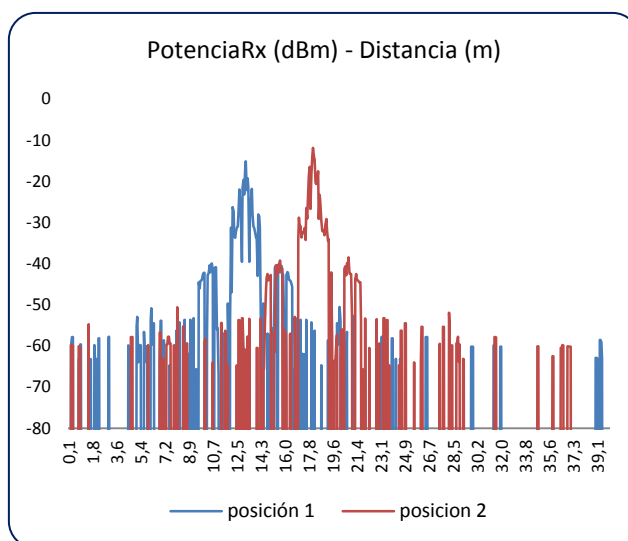


Fig. 90. Potencia recibida (dBm) en función de la distancia (m) que compara para altura de 2.6 m las dos posiciones de antena que se han considerado.

Las características de la propagación multirrayecto se pueden observar mediante la obtención de los perfiles retardo-potencia. En este sentido, mediante el empleo del código de simulación de lanzamiento de rayos 3D se han obtenido valores de perfiles de retardo-potencia para el primer caso de simulación (posición de la antena representada en la Figura 3a). En las Figuras 91, 92 y 93 se pueden observar diferentes puntos de perfil retardo-potencia.

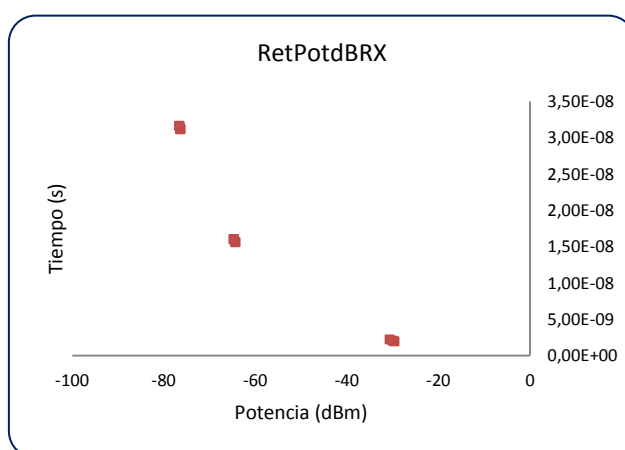


Fig. 91. Estimación de Perfil Retardo Potencia para el punto a una distancia de la antena de 1 m hacia la derecha.

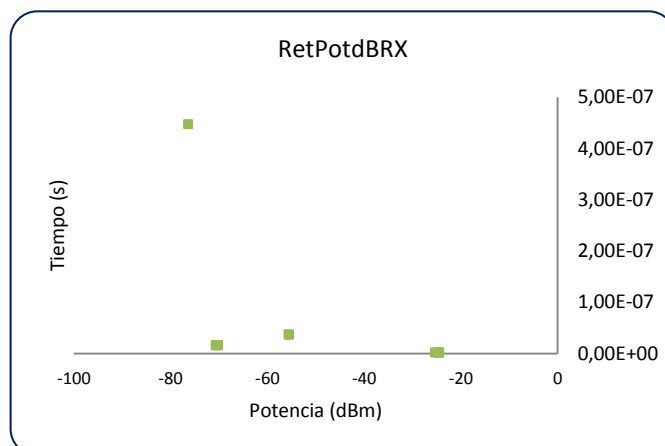


Fig. 92. Estimación de Perfil Retardo Potencia para el punto a una distancia de la antena de 1 m hacia la izquierda.

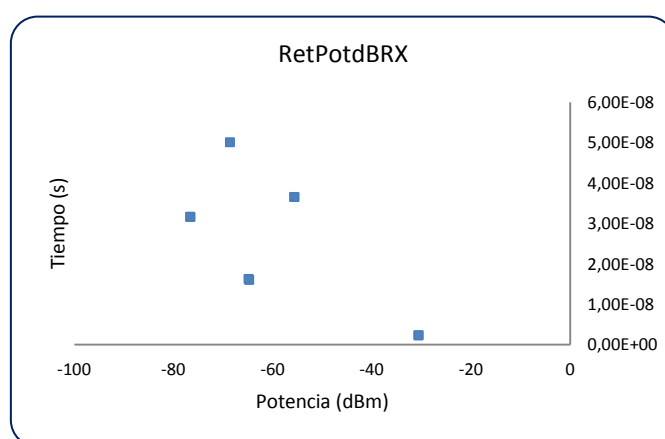


Fig. 93. Estimación de Perfil Retardo Potencia para el punto a una distancia de la antena de 1 m hacia adelante.

Tal y como se observa de las figuras anteriores, las representaciones de los perfiles retardo-potencia presentan variación, tanto en la distribución temporal de los ecos frente a la componente especular, como en el valor de potencia recibida. Esto nuevamente confirma la fuerte dependencia topológica en la respuesta del canal radioeléctrico, lo que tiene un impacto directo en la ubicación de los transceptores en los vagones.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha analizado la dependencia con la posición de la respuesta del canal radioeléctrico en el caso de interconexión de vagones de tren. Mediante el empleo del algoritmo basado en lanzamiento de rayos 3D, se puede analizar la respuesta para diferentes ubicaciones de transceptores en el techo de los vagones, particularizado para el caso de intercomunicación entre dos vagones. Tanto los resultados de potencia recibida como los valores de perfiles de retardo potencia muestran dicha dependencia topológica, fuertemente determinada por las componentes de propagación multitrayecto presentes. Estos resultados pueden servir para establecer la correcta planificación radioeléctrica de la red de sensores, optimizando la ubicación de los mismos en el caso general de N vagones, con el fin de obtener el valor adecuado de potencia recibida frente a sensibilidad y minimizar el consumo energético.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al proyecto INNPACTO-RAILTRACE para el desarrollo del trabajo presentado.

VI. REFERENCIAS

- [1] Farahani, S. *ZigBee Wireless Networks and Transceivers*, Newnes, 2008.
- [2] <http://www.contrenrenfe.com/40box.html>
- [3] Iskander, M.F. and Yun, Z., "Propagation Prediction Models for Wireless Communications Systems" *Microwave Theory and Techniques*, IEEE Transaction on, vol. 50, n°3, pp. 662-673, March 2002.
- [4] Saez de Adana, F. and Blanco, G. and Diego, G. and Arriaga, P. and Cátedra, M. F., "Propagation Model Based on Ray Tracing for the Design of Personal Communication Systems in Indoor Environments" *Vehicular Technology*, IEEE Transactions on, vol. 49, no 6, pp. 2105-2112, November 2000.
- [5] <http://www.libelium.com/products/waspnote>

ANEXO B

Herramientas utilizadas

Herramientas utilizadas

A la hora de realizar las simulaciones con el algoritmo de trazado de rayos 3D, se ha utilizado un ordenador LENOVO thinkstation con sistema operativo Windows7 de 64 bits del laboratorio i+d+I Jerónimo de Ayanz de la Universidad Pública de Navarra, debido a la elevada capacidad de memoria que requieren dichas simulaciones.

Para llevar a cabo las simulaciones se ha hecho uso del programa Matlab R2009b 64 Bits de MathWorks.

Las representaciones gráficas de los planos bidimensionales de potencia recibida se han llevado a cabo con SigmaPlot v.11.0.

Microsoft Excel 2010 se ha usado para realizar gráficas tipo radiales y dibujar los perfiles de retardo potencia.

La elaboración de la memoria se ha llevado a cabo con el editor de texto Microsoft Word 2010.

1 Hardware

El Hardware utilizado para las simulaciones ha sido un ordenador LENOVO thinkstation con las siguientes características:

- Procesador Intel(R) Xenon(R) CPU X5650 @ 2,67GHz 2,66GHz (2 procesadores).
- Memoria SDRAM2 64 Gb.
- Tarjeta gráfica nVidiaQuadro 600 de 128 MB.
- Disco duro de Seagate 1Tbits SCSI a 7200 rpm.



Fig. 94. Ordenador LENOVO thinkstation del laboratorio i+d+I Jerónimo de Ayanz.

2 Software

2.1 Matlab

MATLAB (MATrixLABoratory) es un entorno de desarrollo integrado de computación numérica que utiliza el lenguaje de programación M desarrollado en 1984 por la empresa Math-Works.

La elección de usar Matlab para implementar el algoritmo en el lenguaje de programación M ha sido promovida por el hecho de que éste permite realizar operaciones matemáticas numéricas de un modo muy sencillo, gracias a la simplicidad de su sintaxis.

Además, Matlab ofrece una gran facilidad a la hora de mostrar los resultados gracias a sus potentes herramientas gráficas.

Las características más importantes de Matlab son:

- Lenguaje de programación de alto nivel.
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos.
- Funciones matemáticas para el álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier, filtrado, optimización e integración numérica.
- Funciones para la visualización de datos en gráficas en 2 y 3 dimensiones.
- Herramientas para la creación de interfaces gráficas de usuario personalizadas.

Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones externas, e idiomas, tales como C, C++, Fortran, Java, COM y Microsoft Excel.



Fig. 95. Matlab R2009b 64 Bits de MathWorks.

2.2 SigmaPlot

SigmaPlot es uno de los paquetes estadísticos más conocidos. A partir de una sencilla hoja de cálculo permite generar gráficas de alta calidad y efectuar análisis estadísticos complejos.

Las más de 100 gráficas en 2D y 3D de SigmaPlot, fáciles de personalizar y publicar. Pero SigmaPlot no se dedica exclusivamente a la representación de datos: 50 pruebas estadísticas y la integración con Excel dan buena cuenta de su poderío analítico.

Las características más importantes de SigmaPlot son:

- Más de 100 tipos de gráficas 2D y 3D.
- 50 pruebas estadísticas con asistente.
- Integración con Microsoft Office.
- Extensible a través de macros Visual Basic.
- Magnífica ayuda en línea.

Este programa recoge los datos resultantes de la simulación del modelo de trazado de rayos y permite crear gráficas bidimensionales de potencia recibida representativas del radio de cobertura de un corte determinado de la altura del escenario que previamente ha sido simulado en Matlab.



Fig. 96. SigmaPlot v.11.0.

2.3 Microsoft Office

Dentro del entorno Microsoft Office 2010 se han utilizado dos programas en concreto:

- Microsoft Excel.
- Microsoft Word.

Microsoft Excel 2010 es un software específico para hojas de cálculos donde se pueden ejecutar variables, posee una elegante interfaz, práctica y funcional donde el usuario podrá gestionar rápidamente su información y visualizar todos los datos en la forma mejor clasificada.

Con Microsoft Excel tendrá a disposición uno de los programas del paquete Office para trabajar creando y gestionando la información de las hojas de cálculo.

Las características más importantes de Microsoft Excel son:

- Gráficos que podrá plasmarlos desde la propia celda ya que se encuentran integrados en las mismas.
- Creación de documentos compartidos. Gran cantidad de plantillas para la creación de estructuras donde se alojaran los datos.
- Gráficos dinámicos y elegantes.

- Conexión de la aplicación con Internet para compartir los archivos.

Usado para representar gráficas comparativas.



Fig. 97. Microsoft Excel 2010.

Microsoft Word 2010 es el procesador de textos más conocido hoy en día, ya sea desde cero, o usando la multitud de plantillas de que dispone, Microsoft Word ayuda a crear, editar y enriquecer textos con una gran selección de herramientas y contenido complementario.

Las características más importantes de Microsoft Word son:

- Generar tablas y gráficas.
- Crear hipervínculos a páginas web.
- Usar esquemas de color predefinidos.
- Insertar imágenes y capturas de pantalla.
- Guardar a PDF.
- Herramientas de corrección y traducción - Macros para automatizar tareas.



Fig. 98. Microsoft Word 2010.

ANEXO C

Código del escenario de simulación para trazado de rayos 3D

Este es el código utilizado para implementar el escenario descrito en el apartado 4.1 (Resultados de simulación y medida. Descripción del escenario de simulación). En este caso se muestra el código para la primera ubicación del transceptor, para el resto de ubicaciones, solamente cambian las coordenadas que se le imponen a la antena transmisora para cambiar de posición sobre el escenario.

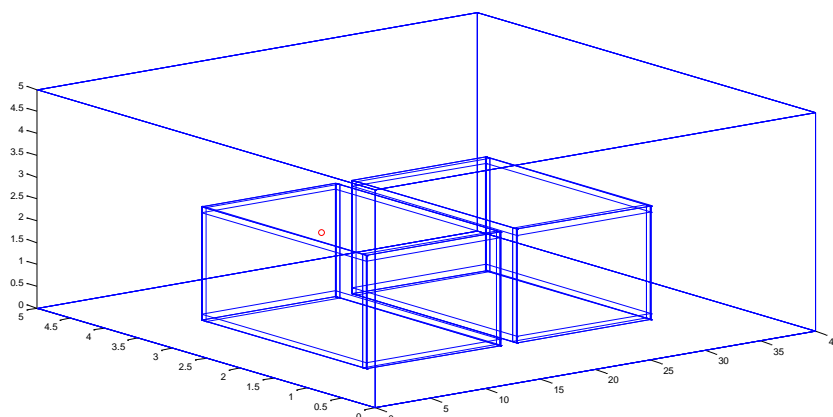


Fig. 99. Representación del escenario de simulación en *Matlab*.

A continuación se muestran las funciones que necesitan ser modificadas del algoritmo trazado de rayos 3D para la simulación con dos vagones de tren y de acuerdo a los parámetros establecidos en la sección 4.1. Aparte de estas funciones que se van a mostrar existen otras que completan dicho algoritmo y que no necesitan ser modificadas.

El siguiente código muestra la función “crearescenarioVAGONESp1.m” en la que se declaran parámetros como la posición y material de las paredes de los vagones y de la habitación; o como los parámetros de la antena transmisora como son rebotes, frecuencia, coordenadas, etc.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función principal crearescenarioVAGONESp1 %%%%%%%%%%

function [room,conexiones,antenastx,antenasrx]=
crearescenarioVAGONESp1

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% HABITACION 1 %%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

a1=40; %largo en x
b1=5; %ancho en y
c1=5; %alto en z
Resx1=ceil(a1/0.0612); %resoluciones de cuboides de 6cm
Resy1=ceil(b1/0.0612);
Resz1=ceil(c1/0.0612);
m1=0; %material interior

%columnas de hormigon
% estanterialroom1 =
fabricaestanteria(1.5,5.3,1,2,0.4,2,0.03,0.03,6,1);
% estanteria2room1 = fabricaestanteria(5,5.3,1,2,0.4,2,0.03,0.03,3,1);

%mesas
% mesalroom1=fabricamesa(1,0.25,0.85,2,0.5,0.05,0.05,1);
% mesa2room1=fabricamesa(5.5,0.25,0.85,2,0.5,0.05,0.05,1);
% mesa3room1=fabricamesa(0.25,3,0.85,0.5,3,0.05,0.05,1);
    
```

```
% mesa4room1=fabricamesa(1,3,0.85,1,1,0.05,0.05,1);
% mesa5room1=fabricamesa(4,3,0.85,1,3,0.05,0.05,1);
% mesa6room1=fabricamesa(3,3,0.85,1,1,0.05,0.05,1);
% mesa7room1=fabricamesa(5,3,0.85,1,1,0.05,0.05,1);

%paredes de los vagones
pared1rueda1=fabricapared(0+7.09,1.22+1.28,1.30,0.055,2.44,2.60,6);
pared2rueda1=fabricapared(12.16+7.09,1.22+1.28,1.30,0.055,2.44,2.60,6);
;
pared3rueda1=fabricapared(6.08+7.09,0+0.03+1.28,1.30,12.16,0.06,2.60,6);
;
pared4rueda1=fabricapared(6.08+7.09,2.44-0.03+1.28,1.30,12.16,0.06,2.60,6);
pared5rueda1=fabricapared(6.08+7.09,1.22+1.28,2.60-0.07,12.16,2.44,0.14,6);
pared6rueda1=fabricapared(6.08+7.09,1.22+1.28,0+0.07,12.16,2.44,0.14,6);
;

pared1rueda2=fabricapared(0+12.16+1.5+7.09,1.22+1.28,1.30,0.055,2.44,2.60,6);
pared2rueda2=fabricapared(12.16+12.16+1.5+7.09,1.22+1.28,1.30,0.055,2.44,2.60,6);
pared3rueda2=fabricapared(6.08+12.16+1.5+7.09,0+0.03+1.28,1.30,12.16,0.06,2.60,6);
pared4rueda2=fabricapared(6.08+12.16+1.5+7.09,2.44-0.03+1.28,1.30,12.16,0.06,2.60,6);
pared5rueda2=fabricapared(6.08+12.16+1.5+7.09,1.22+1.28,2.60-0.07,12.16,2.44,0.14,6);
pared6rueda2=fabricapared(6.08+12.16+1.5+7.09,1.22+1.28,0+0.07,12.16,2.44,0.14,6);

%paredes de la habitación
pared1room1=fabricapared(20,0,2.5,40,0,5,0); %pared delantera
pared2room1=fabricapared(20,5,2.5,40,0,5,0); %pared trasera
pared3room1=fabricapared(40,2.5,2.5,0,5,5,0); %pared derecha
pared4room1=fabricapared(0,2.5,2.5,0,5,5,0); %pared izquierda
pared5room1=fabricapared(20,2.5,5,40,5,0,0); %techo
pared6room1=fabricapared(20,2.5,0,40,5,0,0); %suelo

pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared1rueda1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared2rueda1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared3rueda1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared4rueda1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared5rueda1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared6rueda1);

pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared1rueda2);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared2rueda2);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared3rueda2);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared4rueda2);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared5rueda2);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared6rueda2);

pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared1room1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared2room1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared3room1);
pintaobstaculo(a1,b1,c1,pared4room1);
```

Víctor Garrido Calvo | Ingeniería Técnica en Telecomunicaciones

Víctor Garrido Calvo | Ingeniería Técnica en Telecomunicaciones

Para lanzar el código además, se utilizan otras funciones como la función “extraeparametros.m” donde se especifican por ejemplo valores como la potencia del transmisor, número de rebotes, etc. O como la función “directividad.m”, en la cual se especifica la directividad de las antenas.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función directividad %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function factor = directividad(tipo,theta,phi)

if tipo == 0      % ISOTROPICA
    factor = [1,1];
elseif tipo == 10 % ISOTROPICA
    factor = [5.0119,1];

elseif tipo ==1 % OMNIDIRECCIONAL (Dipolo elemental eje y)
    factor = [2.1,sin(theta)^2]; %tipico 1.5

elseif tipo ==100 % OMNIDIRECCIONAL (Dipolo elemental eje y)
    factor = [2.86,sin(theta)^2]; %tipico 1.5

elseif tipo ==2 % OMNIDIRECCIONAL (Dipolo lambda/2 eje y)
    factor = [1.64,(cos(pi/2*cos(theta))/sen(theta))^2]; %tipico 1.64

elseif tipo ==3 % DIRECTIVA con ancho a -3 dB igual a ancho(simetria
    revolución entorno a eje z)

    ancho=60; %grados
    semiancho=(ancho/2)*pi/180; %radianes
    x=1.39/(pi*sin(semiancho));
    u=x*pi*sin(theta);

    factor = [3.9811,(sin(u)/u)^2]; %6dBi

elseif tipo==4 % DIRECTIVA con ancho a -3 dB igual a ancho(simetria
    revolución entorno a eje x)

    ancho=60; %grados
    semiancho=(ancho/2)*pi/180; %radianes
    x=1.39/(pi*sin(semiancho));

    u=x*pi*sin(atan(sqrt(cos(theta)^2+sin(theta)^2*sin(phi)^2)/(sin(theta)
    *cos(phi)))));

    factor = [3.9811,(sin(u)/u)^2]; %6dBi

elseif tipo ==5 % antena1 DIRECTIVA para el escenario de la furgoneta

%    ancho=60; %grados
%    semiancho=(ancho/2)*pi/180; %radianes
%    x=1.39/(pi*sin(semiancho));
    u=3*sin(theta);

    factor = [9.5,(sin(u)/u)^2]; %6dBi

elseif tipo ==6 % antena2 DIRECTIVA para el escenario de la
    furgoneta

```



```
u=3*sin(theta);  
  
factor = [9.68, (sin(u)/u)^2]; %6dBi  
  
end  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función directividad %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función extraeparametros %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

tic

Pr=0.002; % W
Tc=4E-6; %%%Tc=4E-
6;Rb=250Kbps;F=2.4GHz (Zigbee) %%%Para calcular Tc es la inversa de
Rb
%%Tc=1.8E-6;Rb=54Mbps;F=5GHz (Wifi estándar
IEEE 802.11a) %%%
%%Tc=9E-9;Rb=106Kbps;F=860-960MHz %%%
%%Tc=1E-8;Rb=100Mbps;F=2GHz %%%

Fc=2400000000;
Cptx=[0,1];
Cprx=[0,1];
DirectividadTx=1; %tipo
DirectividadRx=0; %tipo
Atheta=pi/45;
Rebmax=5;

parametros =
calculaparametros(room,Pr,Tc,Fc,Cptx,Cprx,DirectividadTx,DirectividadR
x,Atheta,Rebmax);

numerohabitaciones = length(room);

campoE=cell(1,numerohabitaciones);
for i=1:numerohabitaciones
campoE{i}=cell(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
for k2=1:room{i}{1}(5)
for k3=1:room{i}{1}(6)
campoE{i}{k1,k2,k3}=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{1};
end
end
end
end

PotenciaTc=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto isotrópica
for i=1:numerohabitaciones
PotenciaTc{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
for k2=1:room{i}{1}(5)
for k3=1:room{i}{1}(6)
PotenciaTc{i}(k1,k2,k3)=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{2}(1);
end
end
end
end

PotenciaTcdB = cell(1,numerohabitaciones); %supuesto isotrópica
for i=1:numerohabitaciones
PotenciaTcdB{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
for k2=1:room{i}{1}(5)
for k3=1:room{i}{1}(6)

```

```

        if PotenciaTc{i}(k1,k2,k3) == 0
            PotenciaTcdB{i}(k1,k2,k3) = -100;
        else

PotenciaTcdB{i}(k1,k2,k3)=10*log10(PotenciaTc{i}(k1,k2,k3)/1E-3); %son
dBm

        end
    end
end
end

RetardoPotencia=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto isotrópica
for i=1:numerohabitaciones
    RetardoPotencia{i}=cell(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
    for k1=1:room{i}{1}(4)
        for k2=1:room{i}{1}(5)
            for k3=1:room{i}{1}(6)

RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{3};
                end
            end
        end
    end

PotenciaTcRX=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto antena en rx
for i=1:numerohabitaciones
    PotenciaTcRX{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
    for k1=1:room{i}{1}(4)
        for k2=1:room{i}{1}(5)
            for k3=1:room{i}{1}(6)

PotenciaTcRX{i}(k1,k2,k3)=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{4}(1);
                end
            end
        end
    end

PotenciaTcdBRX = cell(1,numerohabitaciones); %supuesto antena en rx
for i=1:numerohabitaciones
    PotenciaTcdBRX{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
    for k1=1:room{i}{1}(4)
        for k2=1:room{i}{1}(5)
            for k3=1:room{i}{1}(6)
                if PotenciaTcRX{i}(k1,k2,k3) == 0
                    PotenciaTcdBRX{i}(k1,k2,k3) = -200;
                else

PotenciaTcdBRX{i}(k1,k2,k3)=10*log10(PotenciaTcRX{i}(k1,k2,k3)/1E-3);
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

RetardoPotenciaRX=cell(1,numerohabitaciones); %supuesto antena en rx
for i=1:numerohabitaciones
RetardoPotenciaRX{i}=cell(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)

RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}=parametros{i}{k1,k2,k3}{1}{5};
        end
    end
end
end

RetardoPotenciaNormalizado=RetardoPotencia; %suma todos los retardos y
cada uno lo divide entre la suma
for i=1:numerohabitaciones
%
RetardoPotenciaNormalizado{i}=cell(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            aux=0;
            for j=1:length(RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}(1,:))
                aux=RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}(1,j)+aux;
            end
            RetardoPotenciaNormalizado{i}{k1,k2,k3}(1,:) =
RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}(1,:)/aux;
        end
    end
end
end

Retardomedio = cell(1,numerohabitaciones);
for i=1:numerohabitaciones
Retardomedio{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            aux=0;
            for j=1:length(RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}(1,:))

aux=RetardoPotenciaNormalizado{i}{k1,k2,k3}(1,j)*RetardoPotenciaNormalizado{i}{k1,k2,k3}(2,j)+aux;
            end
            Retardomedio{i}(k1,k2,k3)=aux;
        end
    end
end
end

Dispersion = cell(1,numerohabitaciones); %varianza --> obtiene a
partir del retardo normalizado y del retardo medio
for i=1:numerohabitaciones
Dispersion{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));

```

```

for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            aux=0;
            for j=1:length(RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}(1,:))
                aux=(RetardoPotenciaNormalizado{i}{k1,k2,k3}(2,j)-
Retardomedio{i}(k1,k2,k3))^2*RetardoPotenciaNormalizado{i}{k1,k2,k3}(1
,j)+aux;
            end

            Dispersion{i}(k1,k2,k3)=sqrt(aux);
        end
    end
end
end

RetardoPotenciaNormalizadoRX=RetardoPotenciaRX;
for i=1:numerohabitaciones
    %
    RetardoPotenciaNormalizado{i}=cell(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}
{1}(6));
    for k1=1:room{i}{1}(4)
        for k2=1:room{i}{1}(5)
            for k3=1:room{i}{1}(6)
                aux=0;
                for j=1:length(RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,:))
                    aux=RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,j)+aux;
                end
                RetardoPotenciaNormalizadoRX{i}{k1,k2,k3}(1,:)=
RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,:)/aux;
            end
        end
    end
end
end

RetardomedioRX = cell(1,numerohabitaciones);
for i=1:numerohabitaciones
    RetardomedioRX{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
    for k1=1:room{i}{1}(4)
        for k2=1:room{i}{1}(5)
            for k3=1:room{i}{1}(6)
                aux=0;
                for j=1:length(RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,:))

aux=RetardoPotenciaNormalizadoRX{i}{k1,k2,k3}(1,j)*RetardoPotenciaNorm
alizadoRX{i}{k1,k2,k3}(2,j)+aux;
                end
                RetardomedioRX{i}(k1,k2,k3)=aux;
            end
        end
    end
end

DispersionRX = cell(1,numerohabitaciones);
for i=1:numerohabitaciones
    DispersionRX{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));

```

```

for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            aux=0;
            for j=1:length(RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,:))
                aux=(RetardoPotenciaNormalizadoRX{i}{k1,k2,k3}(2,j)-
RetardomedioRX{i}(k1,k2,k3))^2*RetardoPotenciaNormalizadoRX{i}{k1,k2,k
3}(1,j)+aux;
            end

            DispersionRX{i}(k1,k2,k3)=sqrt(aux);
        end
    end
end
end

RetardoPotenciadB = RetardoPotencia;
for i=1:numerohabitaciones
% PotenciaTcdB{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            for j=1:length(RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}(1,:))
                if RetardoPotencia{i}{k1,k2,k3}(1,j) == 0
                    RetardoPotenciadB{i}{k1,k2,k3}(1,j) = -200;
                else
RetardoPotenciadB{i}{k1,k2,k3}(1,j)=10*log10(RetardoPotencia{i}{k1,k2,
k3}(1,j)/1E-3);
                end
            end
        end
    end
end
end

RetardoPotenciadBRX = RetardoPotenciaRX;
for i=1:numerohabitaciones
% PotenciaTcdB{i}=zeros(room{i}{1}(4),room{i}{1}(5),room{i}{1}(6));
for k1=1:room{i}{1}(4)
    for k2=1:room{i}{1}(5)
        for k3=1:room{i}{1}(6)
            for j=1:length(RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,:))
                if RetardoPotenciaRX{i}{k1,k2,k3}(1,j) == 0
                    RetardoPotenciadBRX{i}{k1,k2,k3}(1,j) = -200;
                else
RetardoPotenciadBRX{i}{k1,k2,k3}(1,j)=10*log10(RetardoPotenciaRX{i}{k1
,k2,k3}(1,j)/1E-3);
                end
            end
        end
    end
end
end

TiempoExtraeParametros=toc
% save
/home/min/Escritorio/PFC/SIMULACIONES/SENSORES/SINANTENASRX/parametros

```

```
sacados8.mat campoE PotenciaTc PotenciaTcdB RetardoPotencia
PotenciaTcRX PotenciaTcdBRX RetardoPotenciaRX
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función extraeparametros %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Además de estas, se utilizan las funciones “guardoroom.m” y “guardoparametros.m” para indicar el número de habitaciones en que se puede dividir el escenario (una en este caso), las medidas de esas habitaciones así como sus resoluciones; también se especifica el directorio donde se desean guardar los resultados.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función guardoroom %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%Para subdividir la variable room%%%
```

```
%%%LAS RESOLUCIONES LAS TENDRÉ QUE CAMBIAR SEGÚN EL
ESCENARIO%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% %%RESOLUCIONES ESCENARIO JDA%%
% nhabitaciones=1; %n° de habitaciones en el escenario
% a1=13;
% b1=7;
% c1=5;
% %Resolución cuboides de 2x2x7,5cm
% Resx1=650;
% Resy1=350;
% Resz1=66;
% % Resx1=65;
% % Resy1=35;
% % Resz1=25;
% m1=0;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%furgoneta%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
nhabitaciones=1; %n° de habitaciones en el escenario
a1=40; %largo en x
b1=5; %ancho en y
c1=5; %alto en z
Resx1=ceil(a1/0.0612); %resoluciones de cuboides de 6cm
Resy1=ceil(b1/0.0612);
Resz1=ceil(c1/0.0612);
m1=0; %material interior
```

```
% %%escenario LAB JUANANPEIO
% nhabitaciones=1; %n° de habitaciones en el escenario
% a1=5.84; %largo en x
% b1=6.24; %ancho en y
% c1=3.5; %alto en z
% Resx1=50; %resoluciones
% Resy1=52;
% Resz1=8;
% m1=0; %material interior
```

```
% %%%RESOLUCIONES ESCENARIO CALGARY%%
% nhabitaciones=7; %n° de habitaciones en el escenario
% %HABITACION1%
% a1=351;
% b1=445;
```



```
% c1=155;
% Resx1=ceil(a1*0.0254/0.1224);
% Resy1=ceil(b1*0.0254/0.1224);
% Resz1=ceil(c1*0.0254/0.1224);
% %HABITACION2%
% a2=351;
% b2=703;
% c2=155;
% Resx2=ceil(a2*0.0254/0.1224);
% Resy2=ceil(b2*0.0254/0.1224);
% Resz2=ceil(c2*0.0254/0.1224);
% %HABITACION3%
% a3=128.5;
% b3=713.5;
% c3=155;
% Resx3=ceil(a3*0.0254/0.1224);
% Resy3=ceil(b3*0.0254/0.1224);
% Resz3=ceil(c3*0.0254/0.1224);
% %HABITACION4%
% a4=175.5;
% b4=713.5;
% c4=155;
% Resx4=ceil(a4*0.0254/0.1224);
% Resy4=ceil(b4*0.0254/0.1224);
% Resz4=ceil(c4*0.0254/0.1224);
% %HABITACION5%
% a5=717.5;
% b5=348;
% c5=155;
% Resx5=ceil(a5*0.0254/0.1224);
% Resy5=ceil(b5*0.0254/0.1224);
% Resz5=ceil(c5*0.0254/0.1224);
% %HABITACION6%
% Resx6=Resx5;
% Resy6=Resy5;
% Resz6=Resz5;
% %HABITACION7%
% Resx7=Resx6;
% Resy7=Resy6;
% Resz7=Resz6;
%

%%CUIDADO HABRÁ QUE CAMBIAR RESZ DEPENDIENDO DEL ESCENARIO

%Guardo el tiempo que tarda en simular el escenario
save('/Users/Leyre3/Desktop/ResultadosCODIGO1/tiempo.mat','tiempo');

for habitacion=1:nhabitaciones

    %Primero guardo en una sola variable las tres primeras celdas de
    room
    inforoom{habitacion}=cell(1,3);
    for i=1:3
```

```

        inforoom{1,i}=room{1,habitacion}{1,i};
    end;

save(sprintf('/Users/Leyre3/Desktop/ResultadosCODIGO1/Habitacion%d/inforoom%d.mat',habitacion,habitacion),'inforoom');

%Para la celda 4 de room, voy a guardar un archivo .mat por cada una de las
%Resz
if habitacion==1
    Resx=Resx1;
    Resy=Resy1;
    Resz=Resz1;
elseif habitacion==2
    Resx=Resx2;
    Resy=Resy2;
    Resz=Resz2;
elseif habitacion==3
    Resx=Resx3;
    Resy=Resy3;
    Resz=Resz3;
elseif habitacion==4
    Resx=Resx4;
    Resy=Resy4;
    Resz=Resz4;
elseif habitacion==5
    Resx=Resx5;
    Resy=Resy5;
    Resz=Resz5;
elseif habitacion==6
    Resx=Resx6;
    Resy=Resy6;
    Resz=Resz6;
elseif habitacion==7
    Resx=Resx7;
    Resy=Resy7;
    Resz=Resz7;
end;

for indicez=1:Resz
    roomcelda4Resz=cell(1,1);

    roomcelda4Resz{1,1}=room{1,habitacion}{1,4}(:, :, indicez);

    save(sprintf('/Users/Leyre3/Desktop/ResultadosCODIGO1/Habitacion%d/roomcelda4Resz%d.mat',habitacion,indicez), 'roomcelda4Resz');

end;

end;

cd ..

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función guardoroom %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

%% función guardoparametros %%%

%%%LAS RESOLUCIONES LAS TENDRÉ QUE CAMBIAR SEGÚN EL
ESCENARIO%%

```
%RESOLUCIONES ESCENARIO JDA%%
% nhabitaciones=1; %nº de habitaciones en el escenario
% a1=13;
% b1=7;
% c1=5;
% %Resolución cuboides de 5cm
% % Resx1=260;
% % Resy1=140;
% % Resz1=100;
% %Resolución cuboides de 2x2x7,5cm
% Resx1=650;
% Resy1=350;
% Resz1=66;
% %Resolución cuboides 20cm
% % Resx1=65;
% % Resy1=35;
% % Resz1=25;
% m1=0;
```

```
nhabitaciones=1; %nº de habitaciones en el escenario
a1=40; %largo en x
b1=5; %ancho en y
c1=5; %alto en z
Resx1=ceil(a1/0.0612); %resoluciones de cuboides de 6cm
Resy1=ceil(b1/0.0612);
Resz1=ceil(c1/0.0612);
m1=0; %material interior
```

```
% %%escenario LAB JUANANPEIO
% nhabitaciones=1; %nº de habitaciones en el escenario
% a1=5.84; %largo en x
% b1=6.24; %ancho en y
% c1=3.5; %alto en z
% Resx1=50; %resoluciones
% Resy1=52;
% Resz1=8;
% m1=0; %material interior
```

```
% nhabitaciones=1;
% a1=5.84; %largo en x
% b1=6.24; %ancho en y
% c1=3.5; %alto en z
% % Resx1=50; %resoluciones de 12 cm
% % Resy1=52;
% % Resz1=30;
% Resx1=25; %resoluciones de 24 cm
% Resy1=26;
% Resz1=15;
%
% m1=0; %material interior
```

```
% % %%%RESOLUCIONES ESCENARIO CALGARY%%%
%nhabitaciones=7; %n° de habitaciones en el escenario
% %HABITACION1%
% a1=351;
% b1=445;
% c1=155;
% Resx1=ceil(a1*0.0254/0.1224);
% Resy1=ceil(b1*0.0254/0.1224);
% Resz1=ceil(c1*0.0254/0.1224);
% %HABITACION2%
% a2=351;
% b2=703;
% c2=155;
% Resx2=ceil(a2*0.0254/0.1224);
% Resy2=ceil(b2*0.0254/0.1224);
% Resz2=ceil(c2*0.0254/0.1224);
% %HABITACION3%
% a3=128.5;
% b3=713.5;
% c3=155;
% Resx3=ceil(a3*0.0254/0.1224);
% Resy3=ceil(b3*0.0254/0.1224);
% Resz3=ceil(c3*0.0254/0.1224);
% %HABITACION4%
% a4=175.5;
% b4=713.5;
% c4=155;
% Resx4=ceil(a4*0.0254/0.1224);
% Resy4=ceil(b4*0.0254/0.1224);
% Resz4=ceil(c4*0.0254/0.1224);
% %HABITACION5%
% a5=717.5;
% b5=348;
% c5=155;
% Resx5=ceil(a5*0.0254/0.1224);
% Resy5=ceil(b5*0.0254/0.1224);
% Resz5=ceil(c5*0.0254/0.1224);
% %HABITACION6%
% Resx6=Resx5;
% Resy6=Resy5;
% Resz6=Resz5;
% %HABITACION7%
% Resx7=Resx6;
% Resy7=Resy6;
% Resz7=Resz6;

save('/Users/Leyre3/Desktop/ResultadosCODIGO1/TiempoExtraeParametros.m
at','TiempoExtraeParametros');

for habitacion=1:nhabitaciones

    if habitacion==1
        Resx=Resx1;
        Resy=Resy1;
        Resz=Resz1;
    elseif habitacion==2
        Resx=Resx2;
```

```

        Resy=Resy2;
        Resz=Resz2;
    elseif habitacion==3
        Resx=Resx3;
        Resy=Resy3;
        Resz=Resz3;
    elseif habitacion==4
        Resx=Resx4;
        Resy=Resy4;
        Resz=Resz4;
    elseif habitacion==5
        Resx=Resx5;
        Resy=Resy5;
        Resz=Resz5;
    elseif habitacion==6
        Resx=Resx6;
        Resy=Resy6;
        Resz=Resz6;
    elseif habitacion==7
        Resx=Resx7;
        Resy=Resy7;
        Resz=Resz7;
    end;

    for indicez=1:Resz
        RetPotdBRX=cell(1,1);

        RetPotdBRX{1,1}=RetardoPotenciadBRX{1,habitacion}(:, :, indicez);

        save(sprintf('/Users/Leyre3/Desktop/ResultadosCODIGO1/GuardoParametros
/Habitacion%d/RetPotdBRX%d.mat', habitacion, indicez), 'RetPotdBRX');

        CampoElectrico=cell(1,1);
        CampoElectrico{1,1}=campoE{1,habitacion}(:, :, indicez);

        save(sprintf('/Users/Leyre3/Desktop/ResultadosCODIGO1/GuardoParametros
/Habitacion%d/CampoElectrico%d.mat', habitacion, indicez),
'CampoElectrico');

        PotenciadBRX=cell(1,1);
        PotenciadBRX{1,1}=PotenciaTcdBRX{1,habitacion}(:, :, indicez);

        save(sprintf('/Users/Leyre3/Desktop/ResultadosCODIGO1/GuardoParametros
/Habitacion%d/PotenciadBRX%d.mat', habitacion, indicez),
'PotenciadBRX');
    end;

end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función guardoparametros %%%%%%%%%%

```

Por último se hace uso de la función principal, desde la que se ejecutan todas las demás, la función “bancopruebasV6.m”.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función bancopruebas %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

cd crearescenario

%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]= crearescenarioLABRADIO2;

%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]= crearescenarioJUANANPEIOvacio;
%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]= PruebasJdA;
%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]=
crearescenarioJUANANPEIOcalculodosimetria;
%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]= crearescenarioESPACIOEXTERIOR;
%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]= ICTMeasurementroom;
%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]=
crearescenarioFURGONETAobstaculos;
%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]=
crearescenarioFURGONETAvaciacobstaculo;
%[room, conexiones, antenastx, antenasrx]= crearescenariorefraccion
[room, conexiones, antenastx, antenasrx]= crearescenarioVAGONESplr2;

cd ..

cd canal

lanzasimulacion

cd canal

guardoroom

cd POSTPROCESOFINAL

cd CALCULAPARAMETROS

postproceso

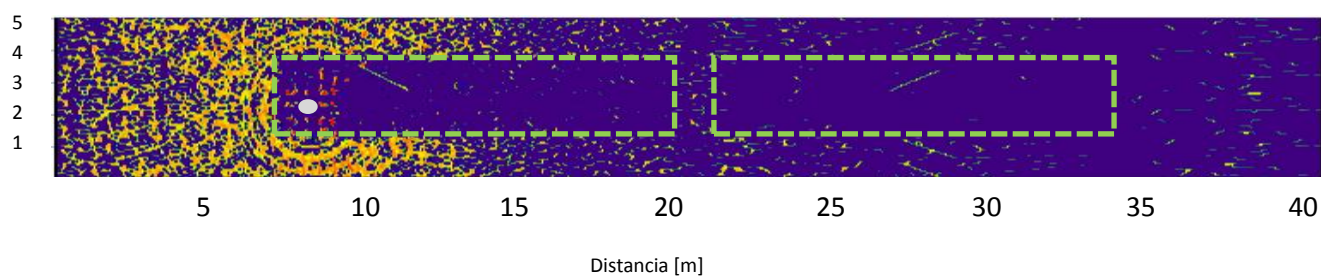
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% función bancopruebas %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

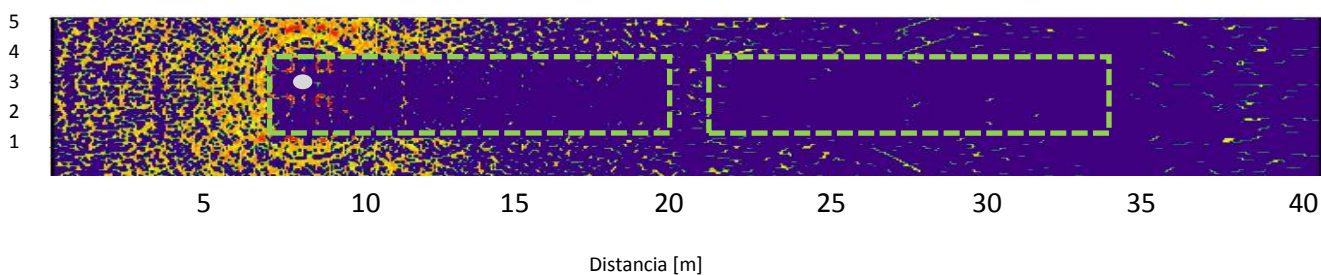
ANEXO D

Resultados adicionales

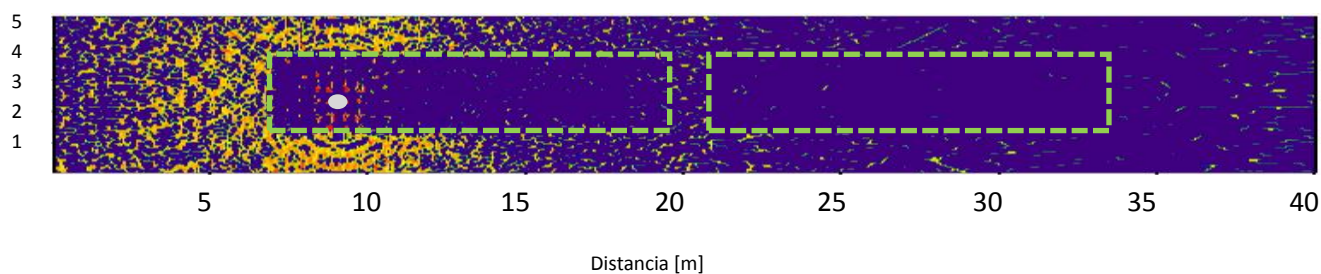
Planos bidimensionales de potencia recibida para la altura de 2 m



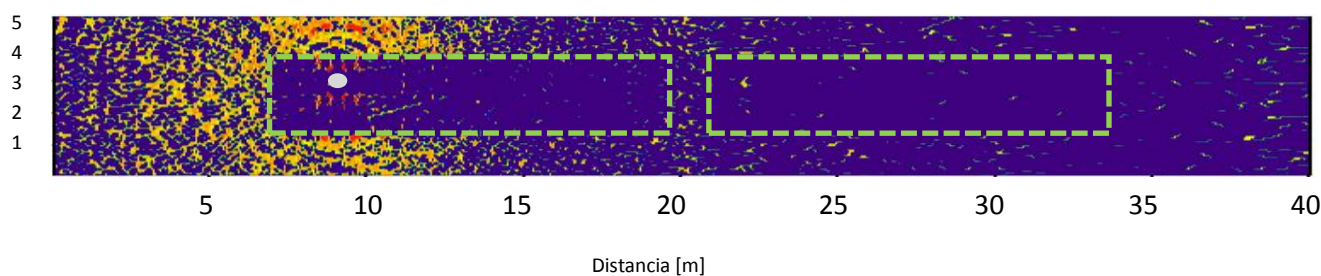
(I)



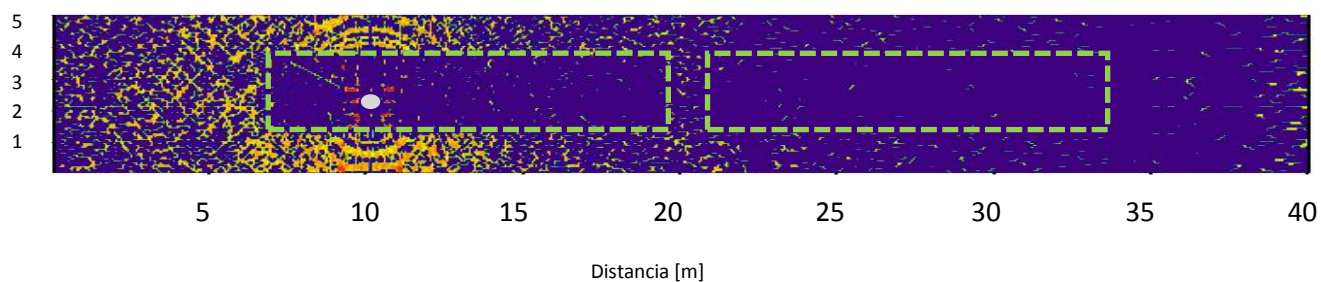
(II)

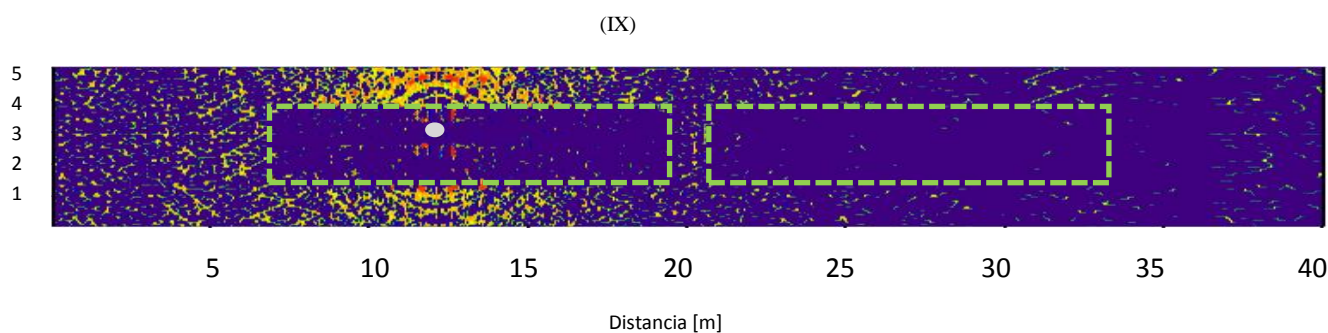
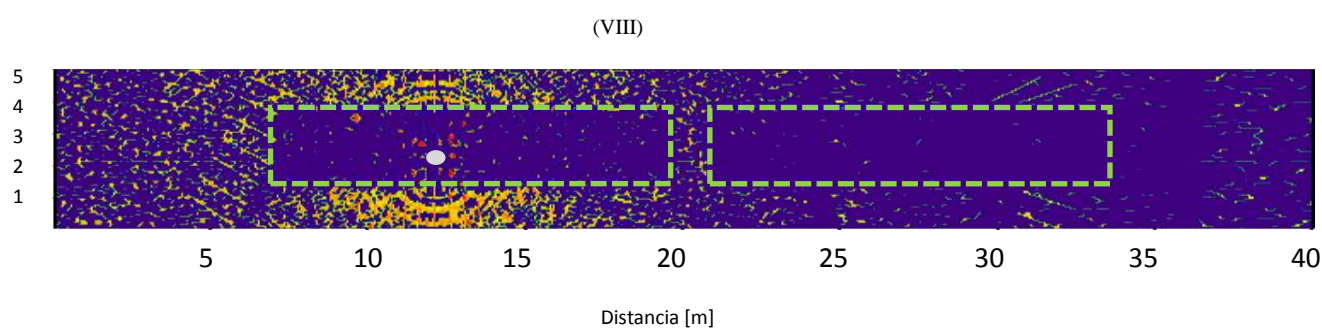
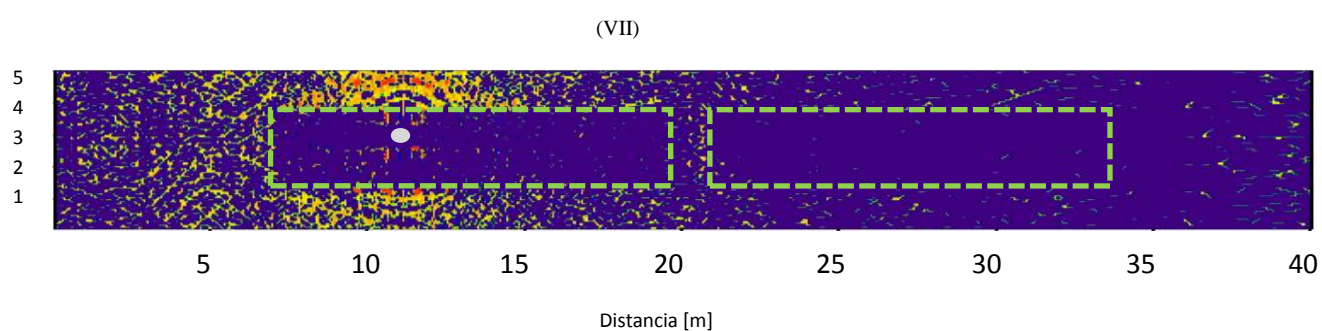
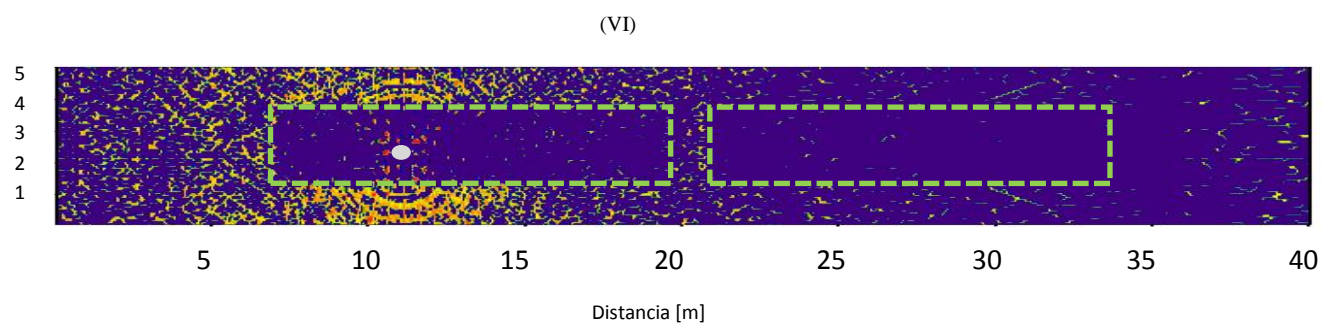
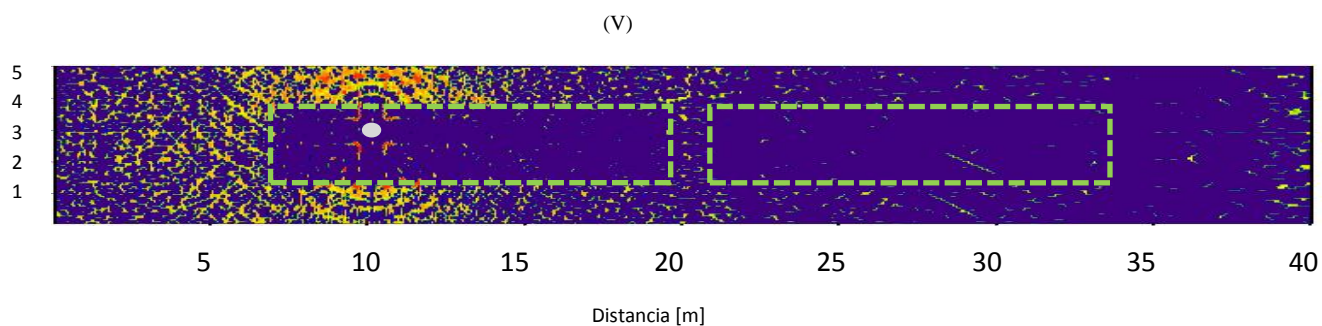


(III)

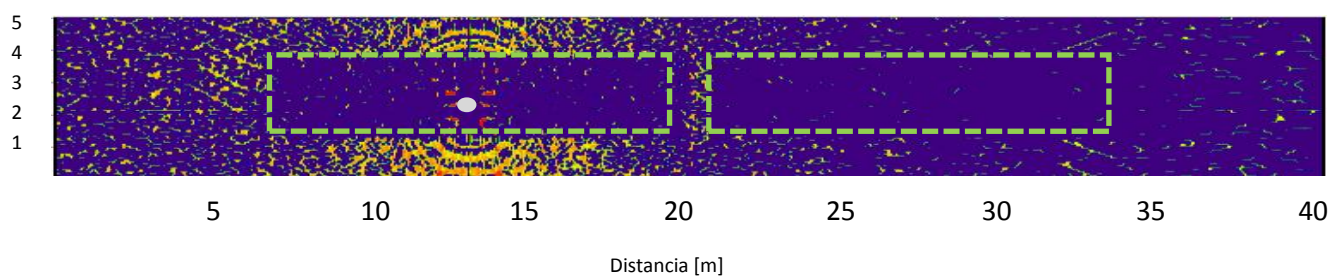


(IV)

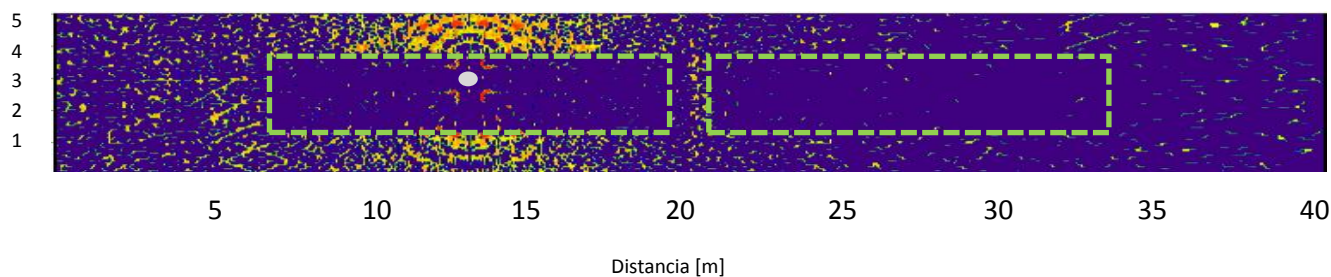




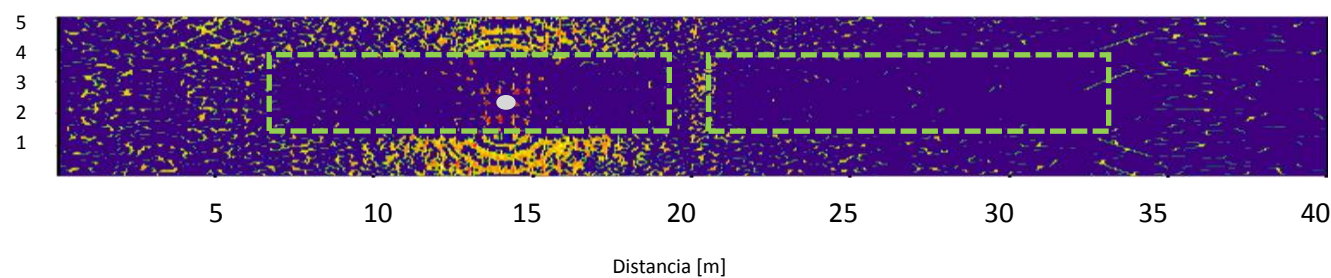
(X)



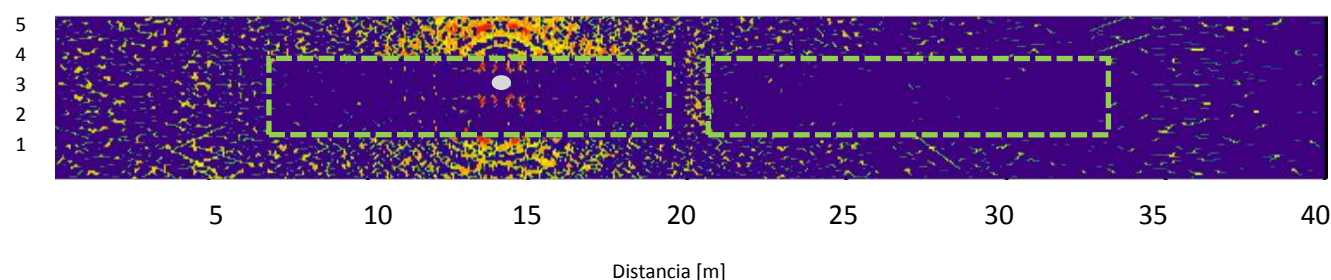
(XI)



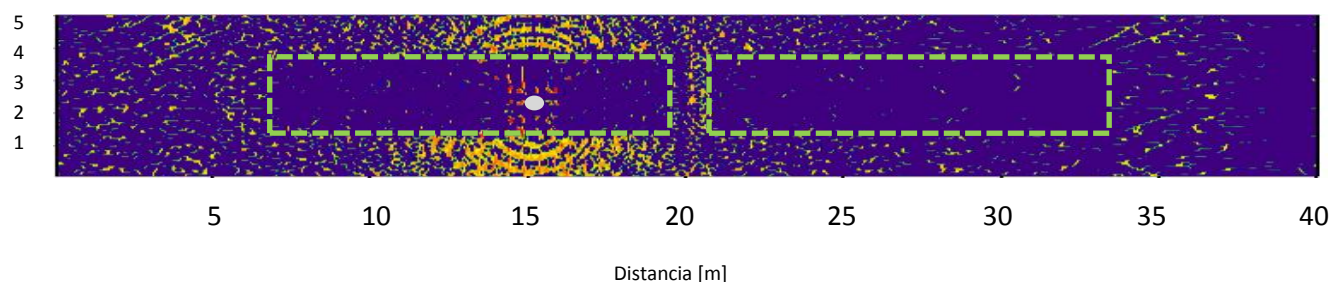
(XII)



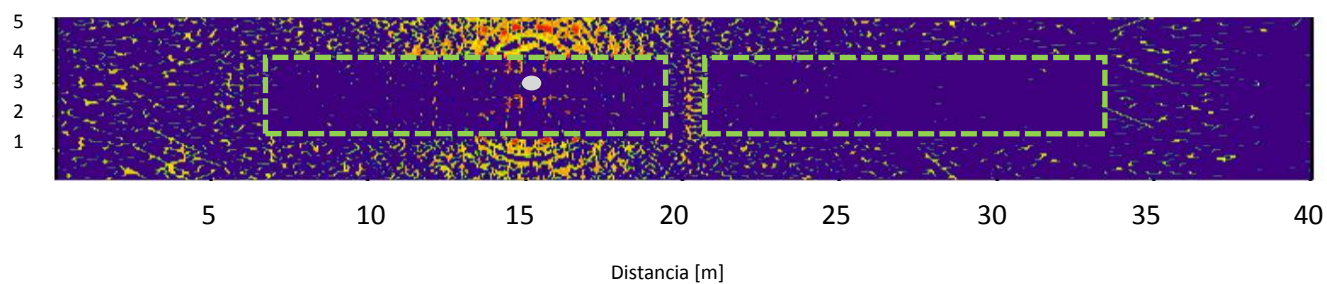
(XIII)



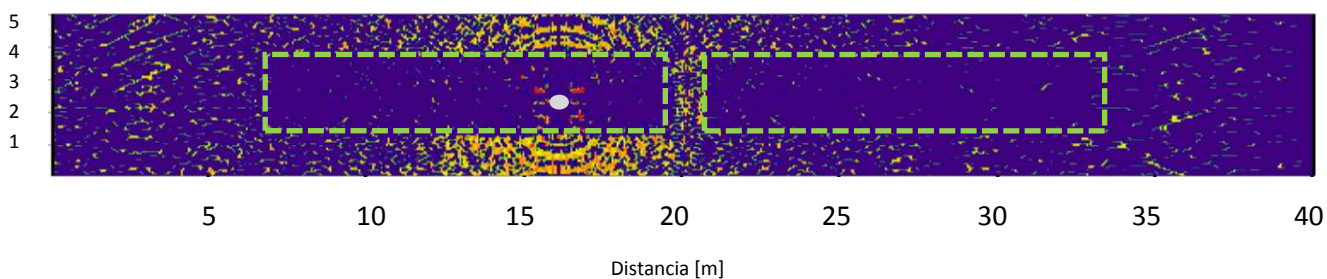
(XIV)



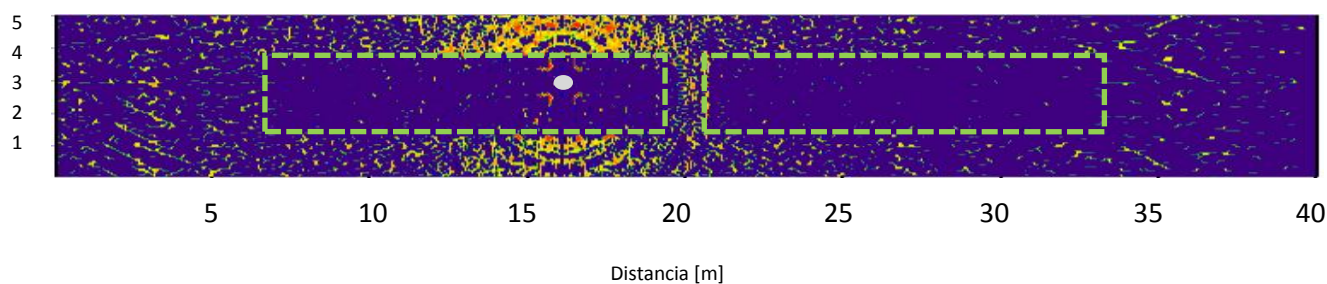
(XV)



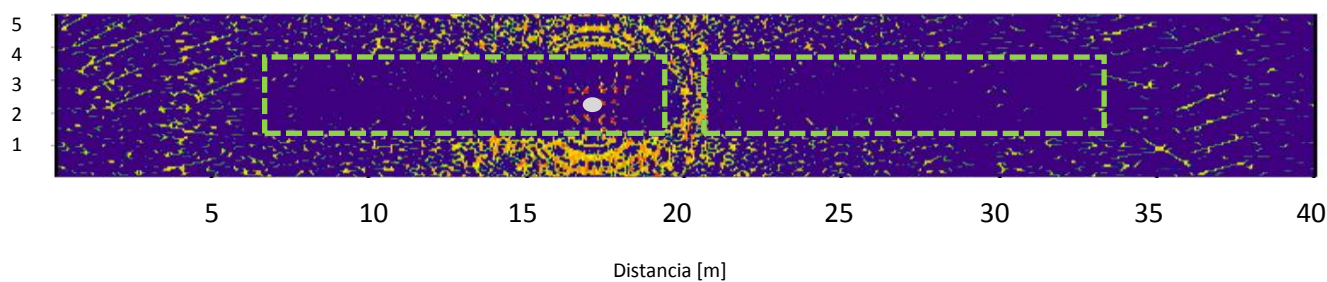
(XVI)



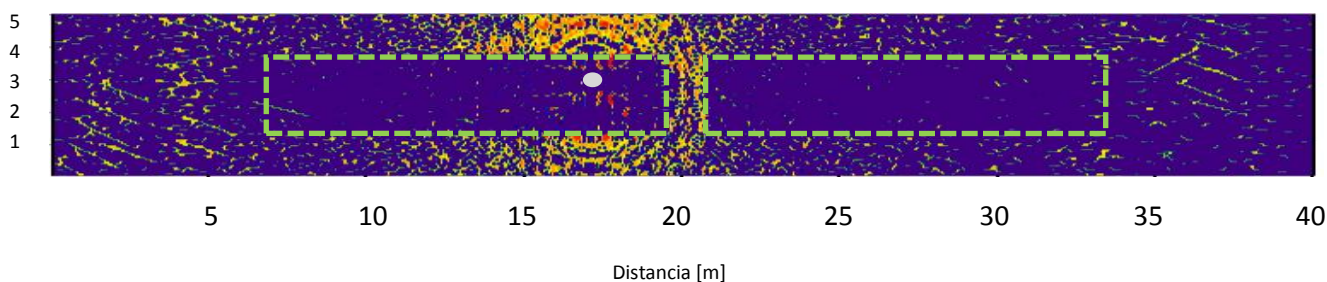
(XVII)



(XVIII)



(XIX)



(XX)

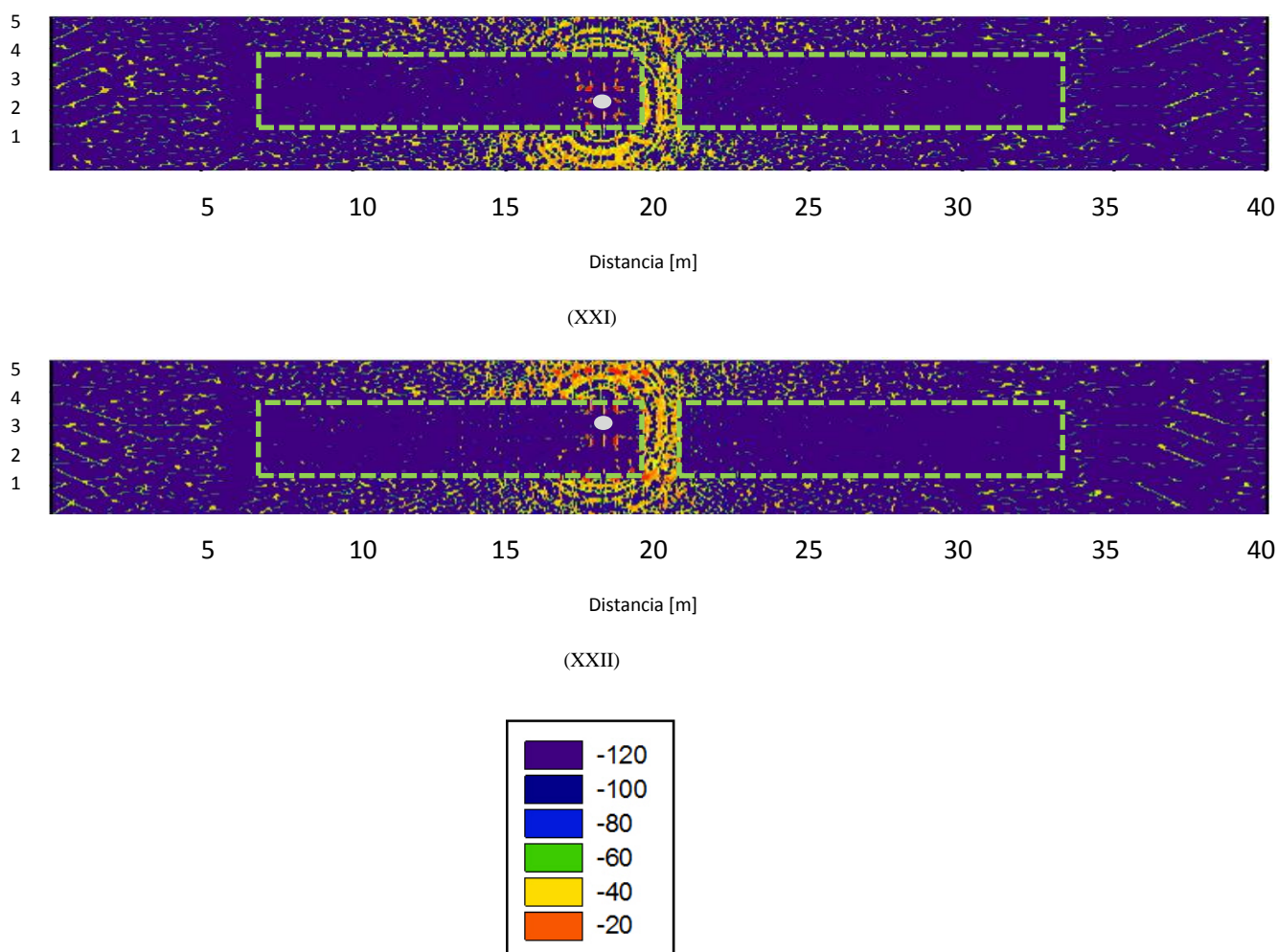
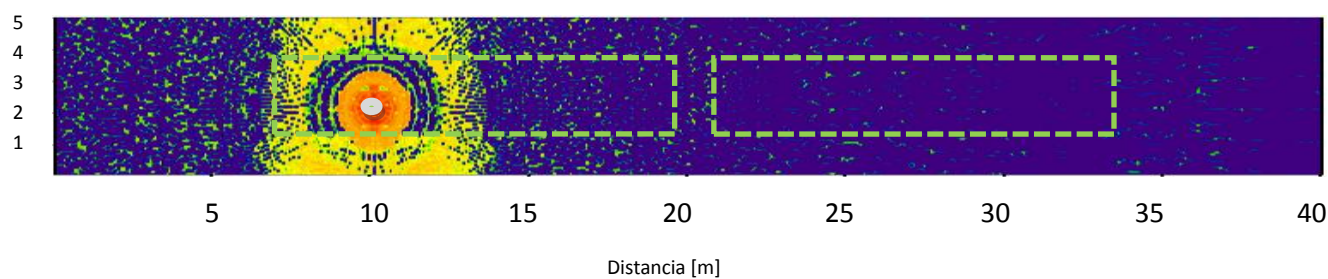
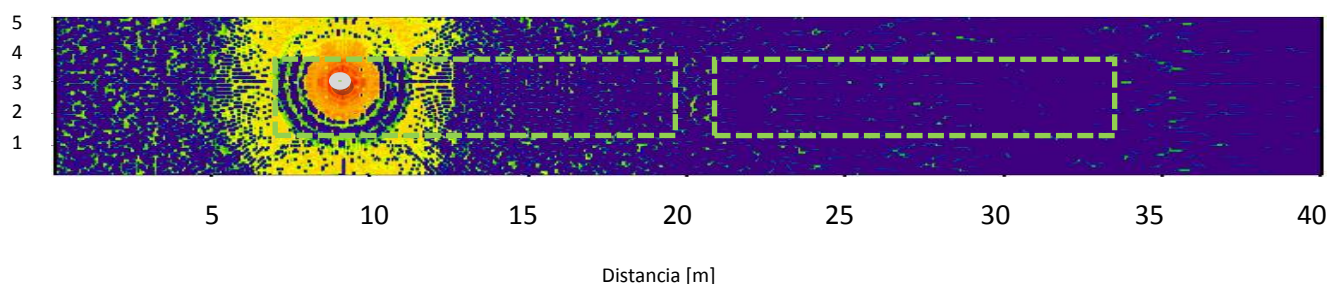
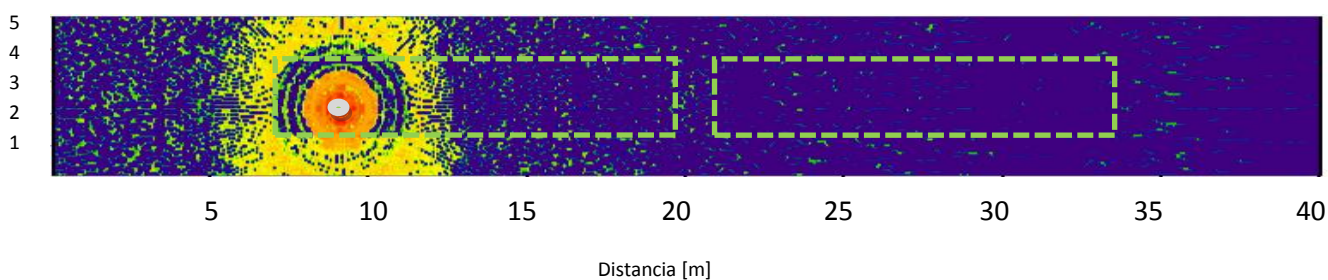
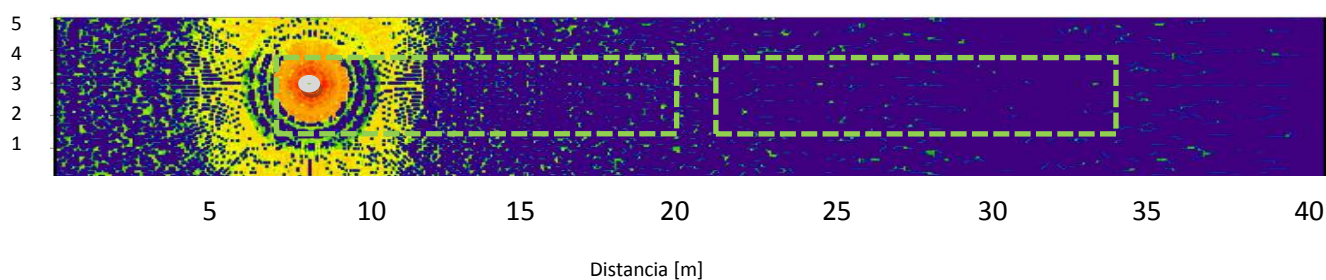
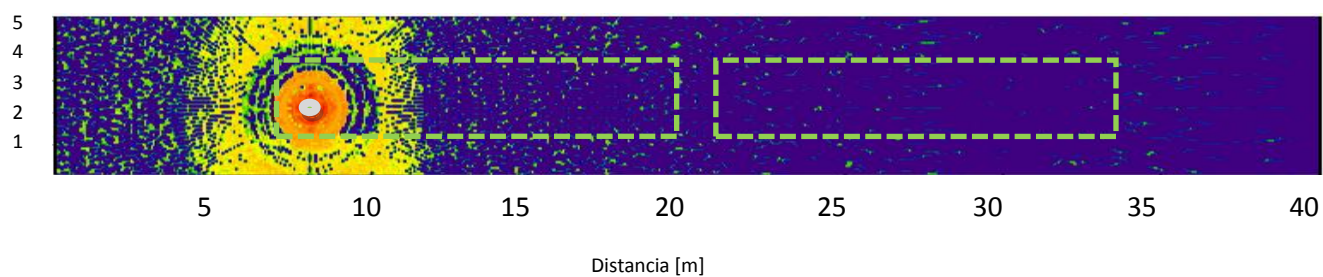
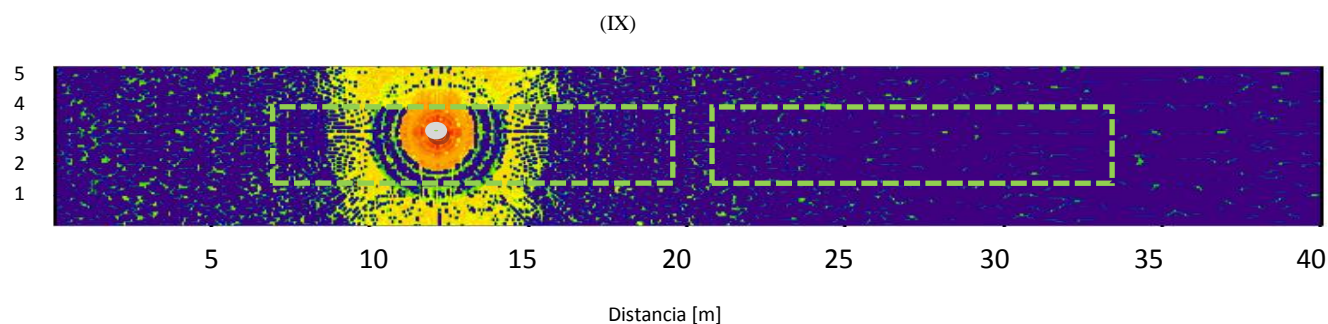
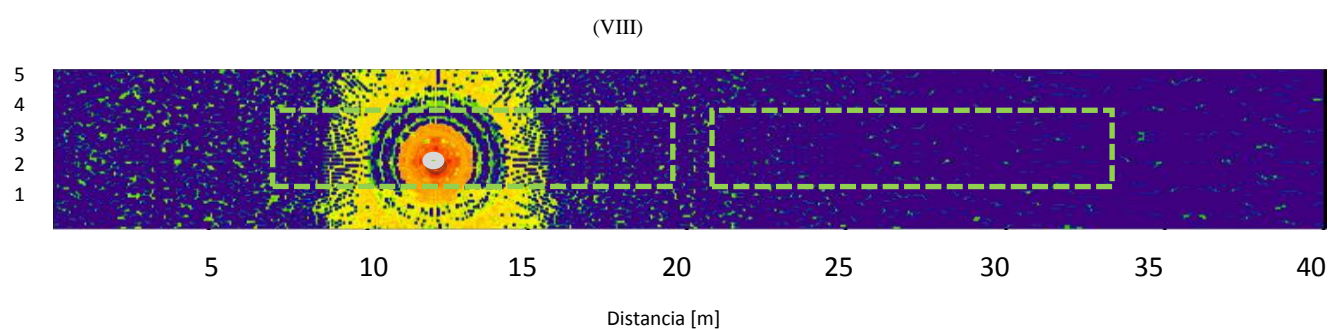
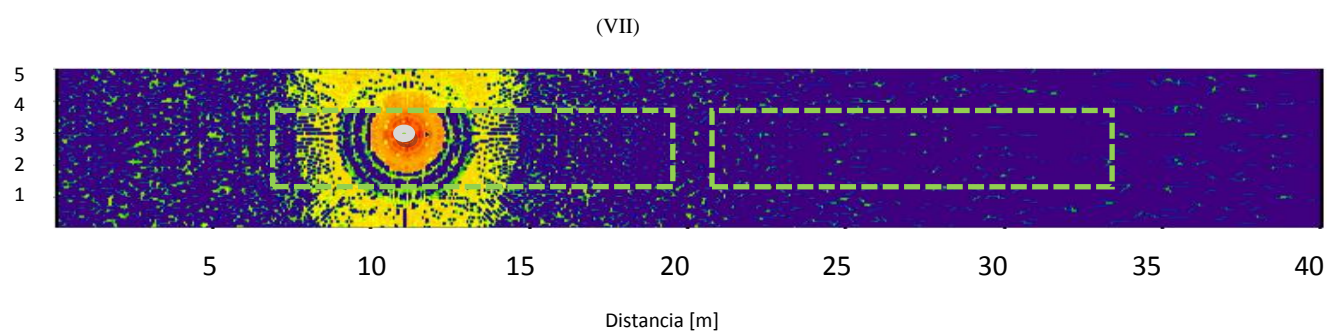
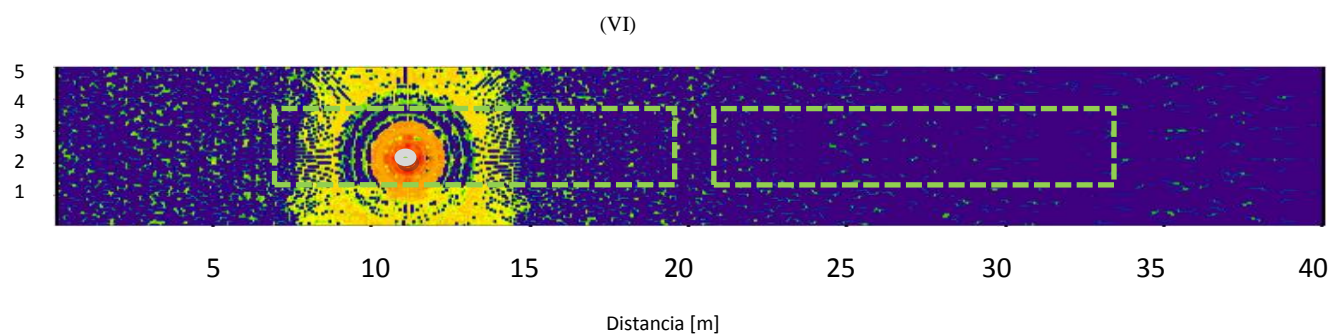
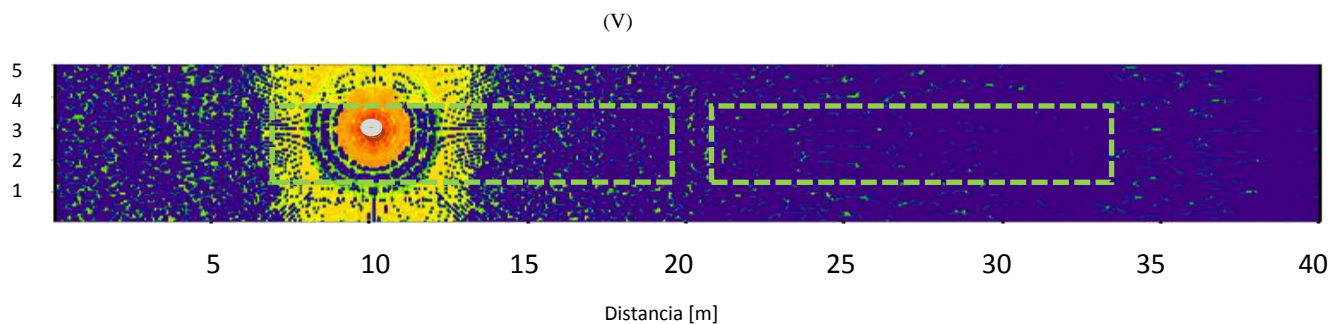


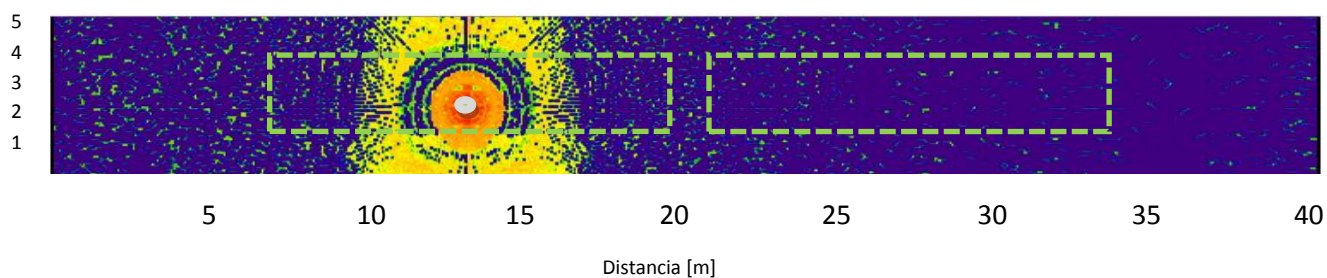
Fig. 100. Potencia recibida (dBm) para la altura de 2 m para las ubicaciones del transceptor. El símbolo de color gris muestra donde quedaría colocado el transceptor sobre el plano bidimensional.

Planos bidimensionales de potencia recibida para la altura de 2.6 m

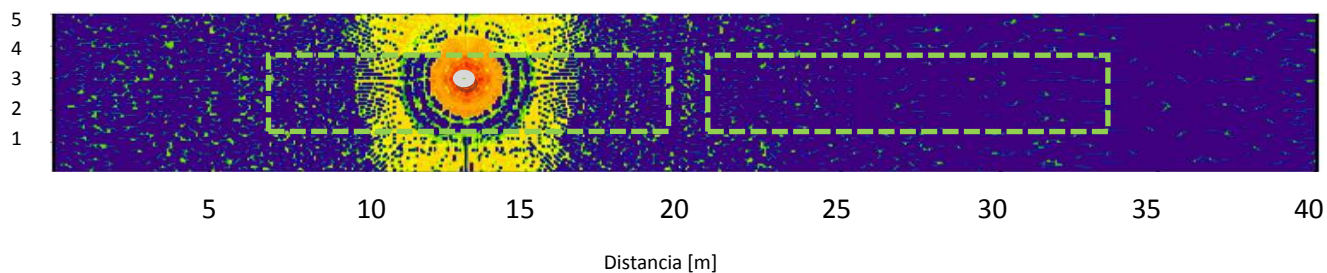




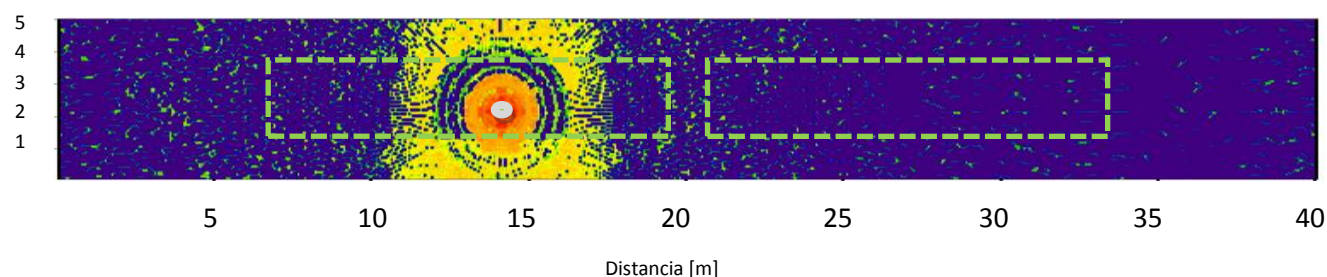
(X)



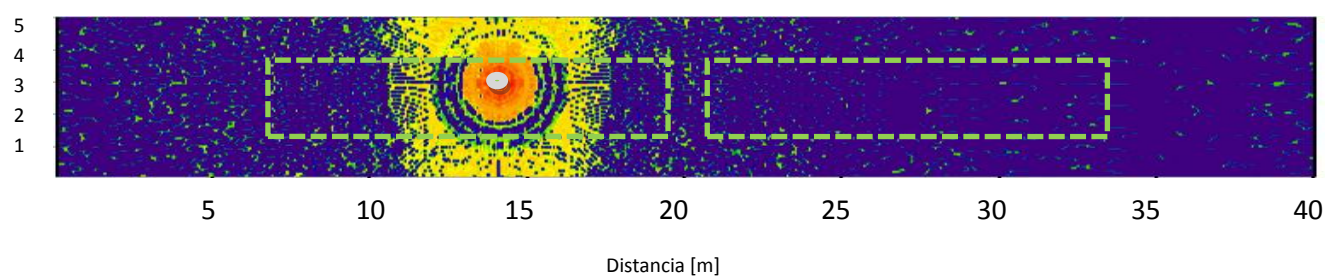
(XI)



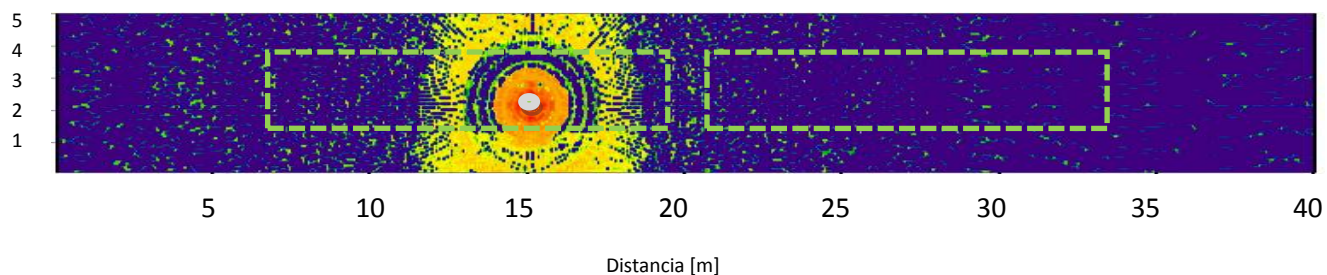
(XII)



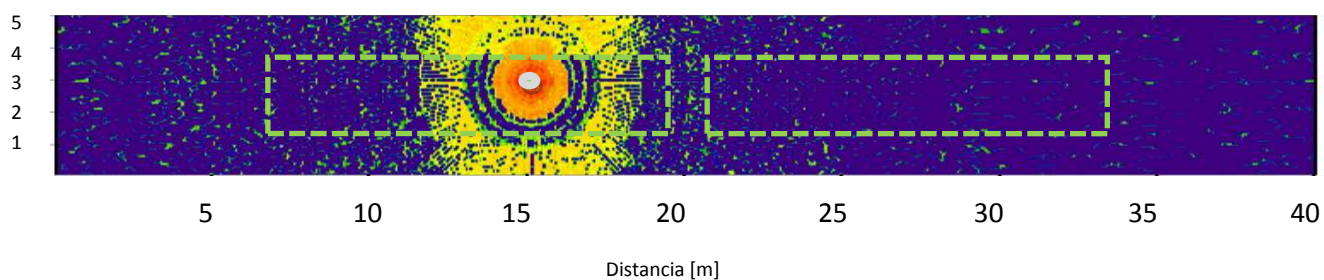
(XIII)



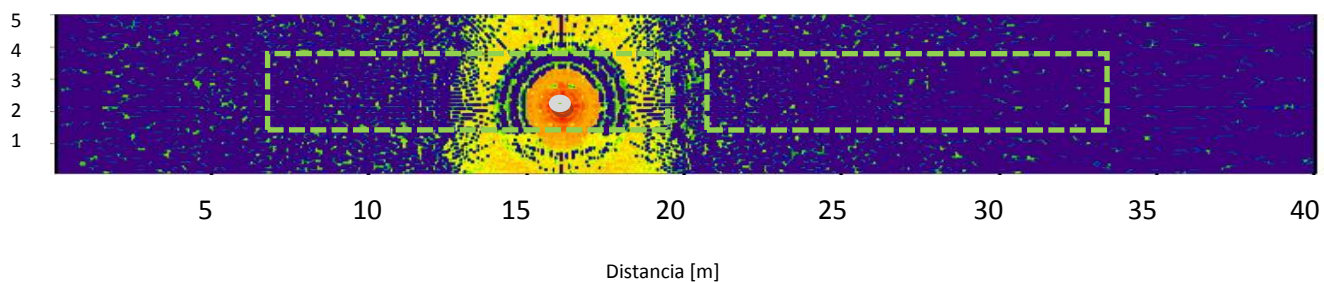
(XIV)



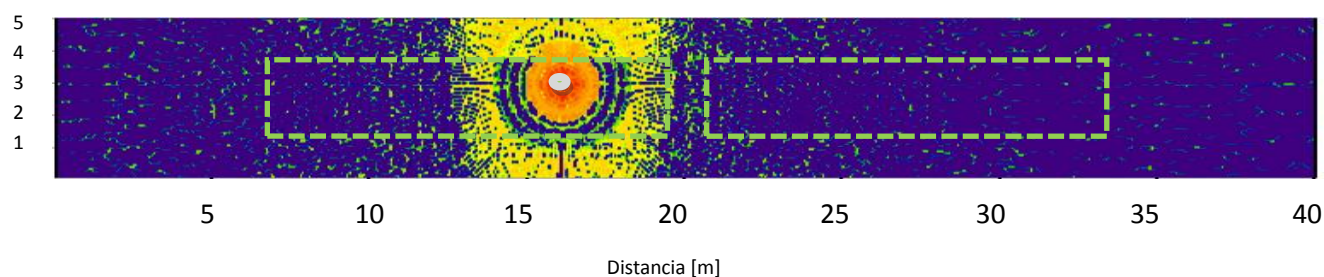
(XV)



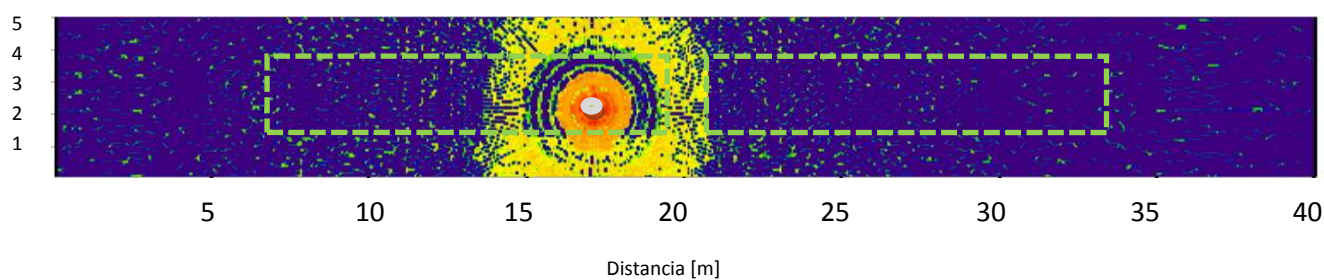
(XVI)



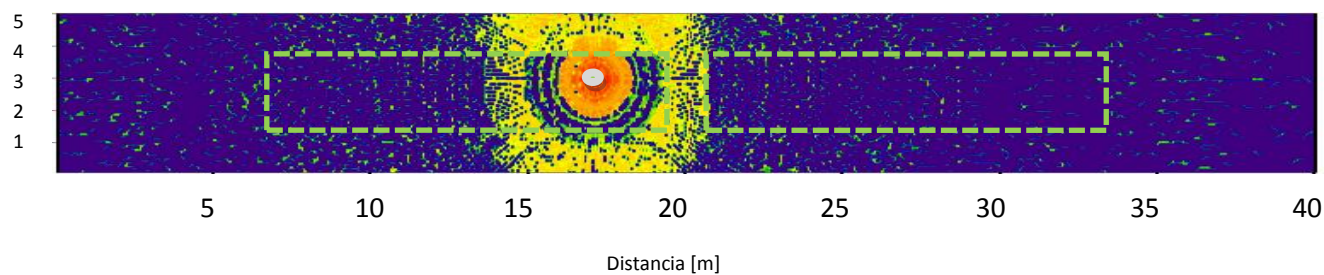
(XVII)



(XVIII)



(XIX)



(XX)

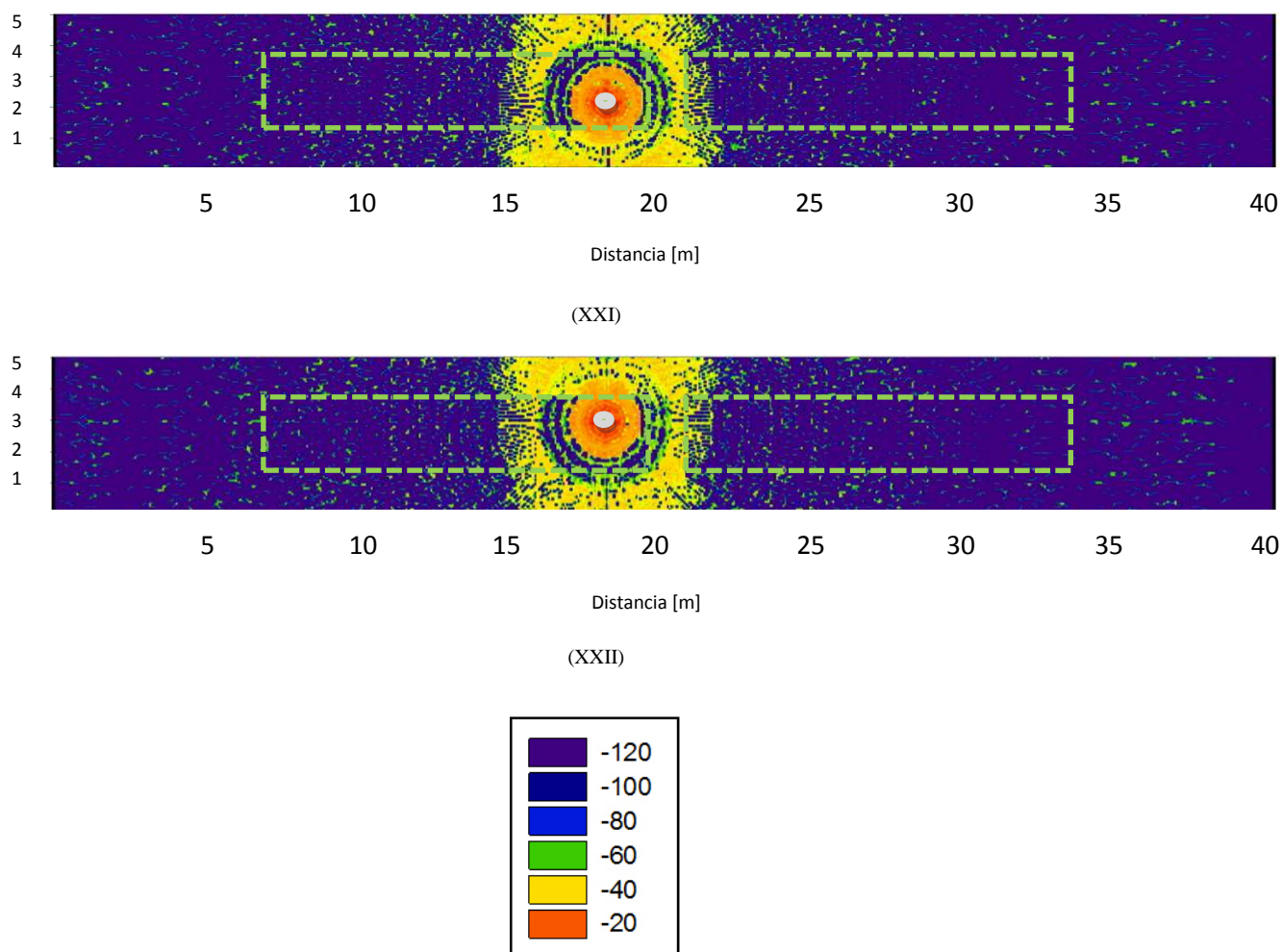
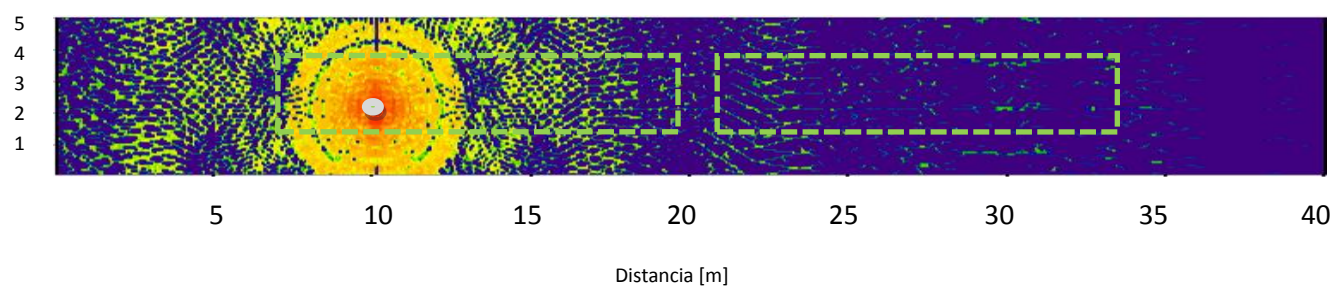
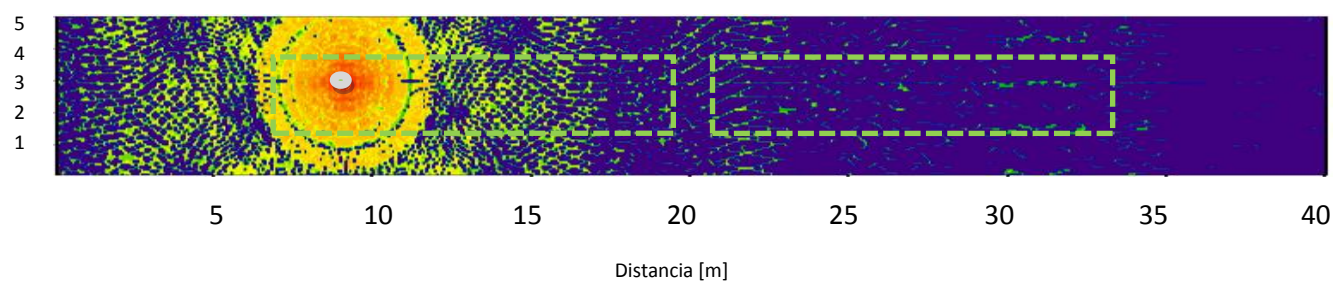
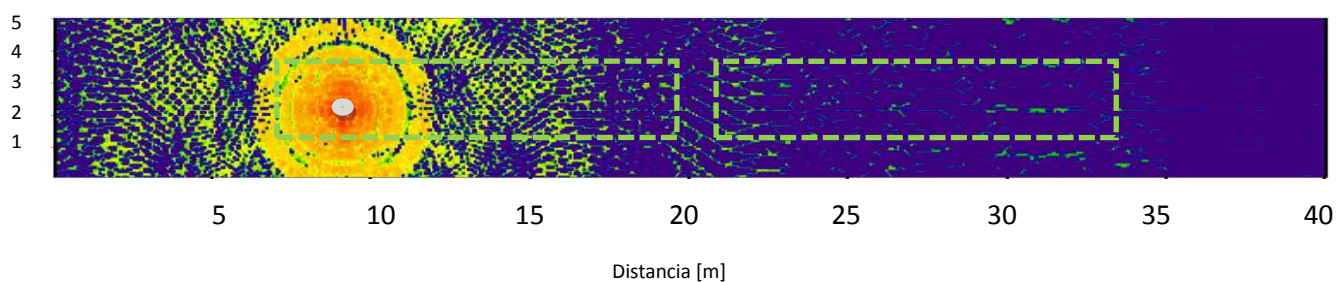
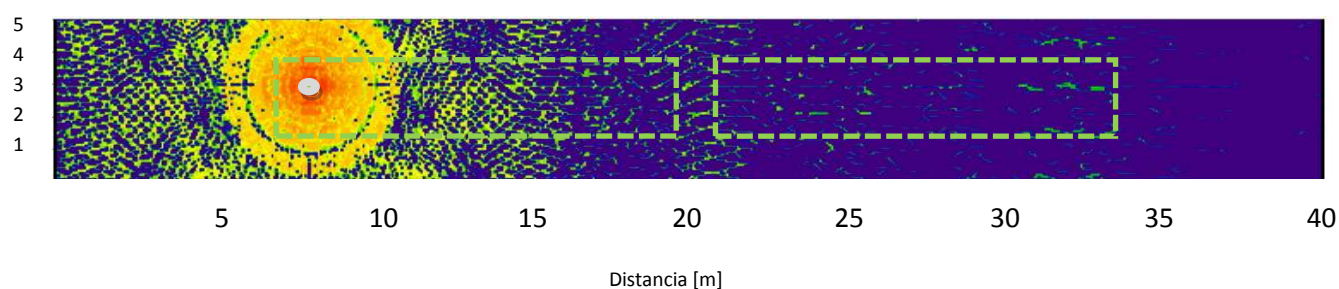
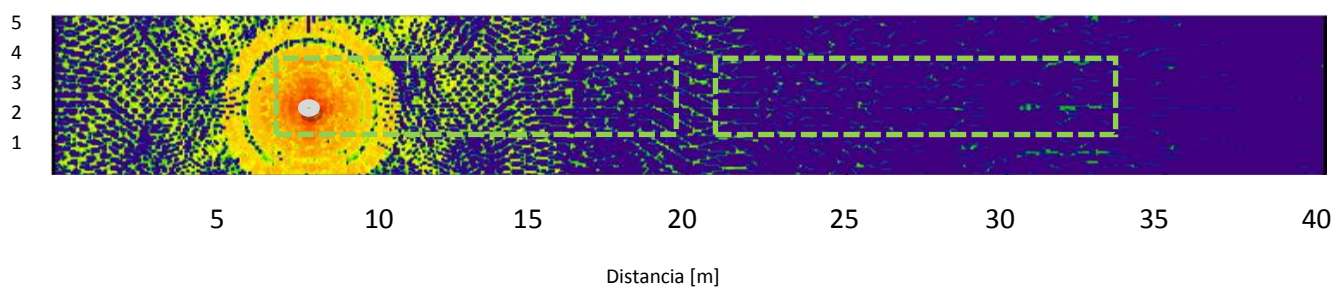
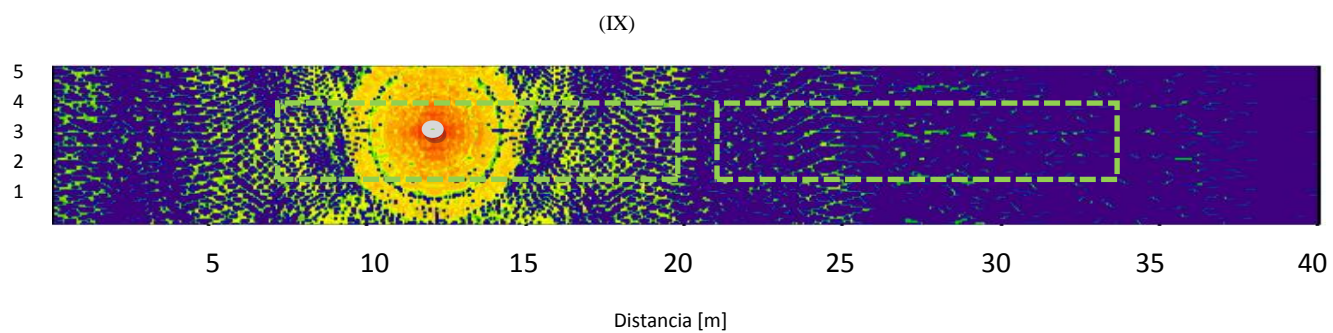
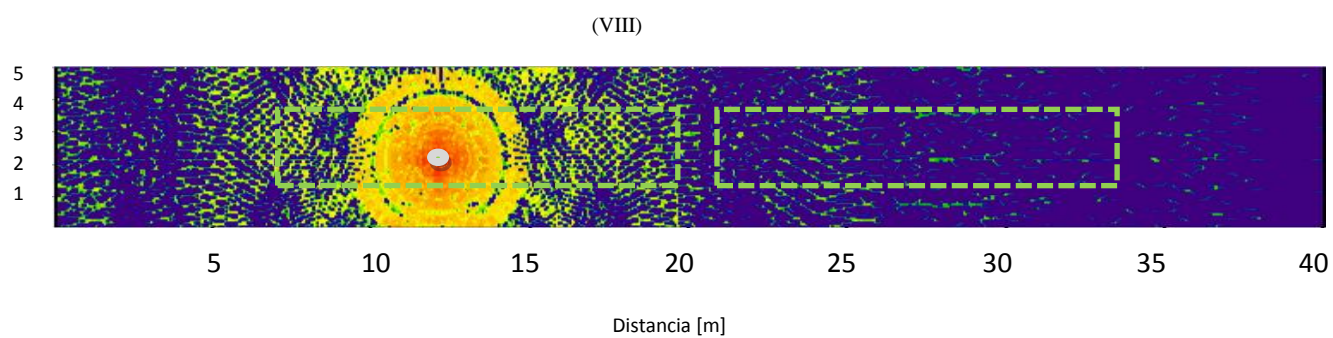
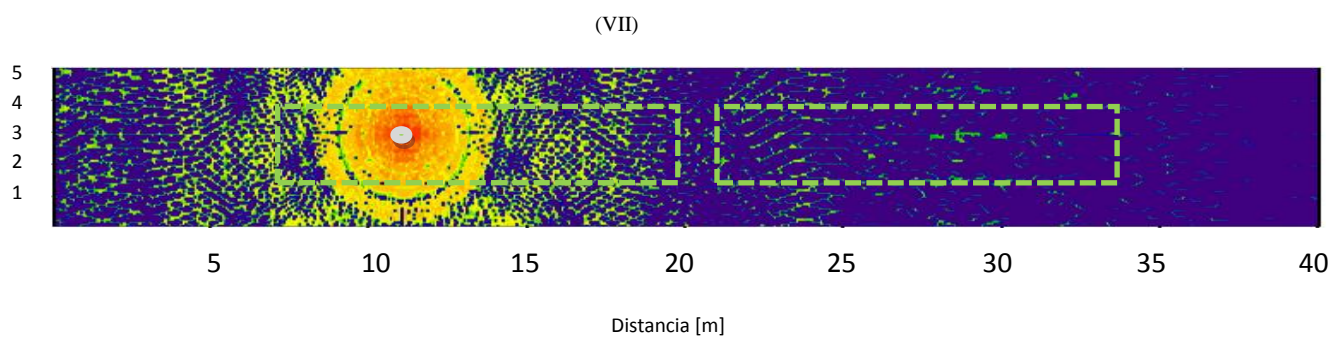
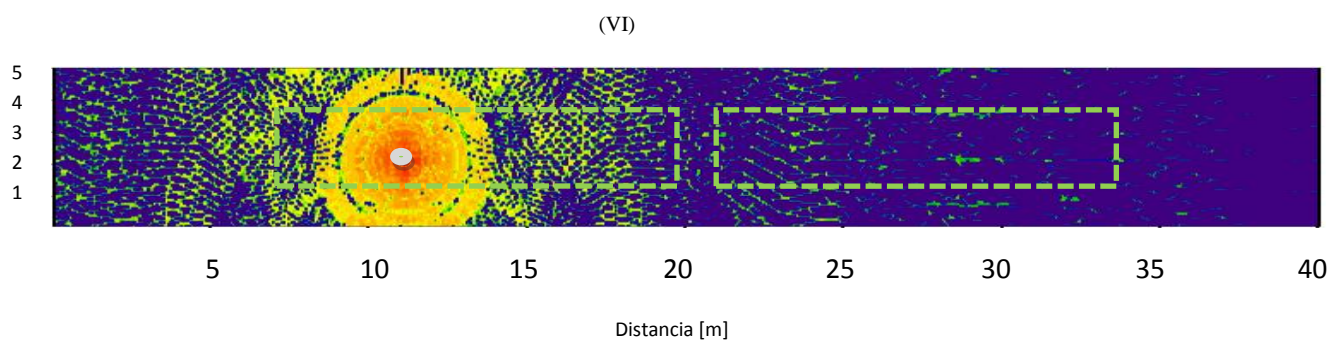
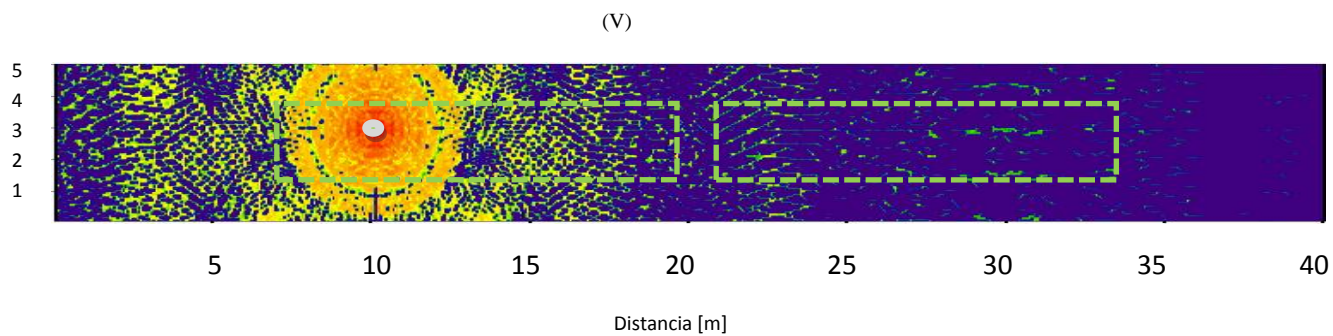
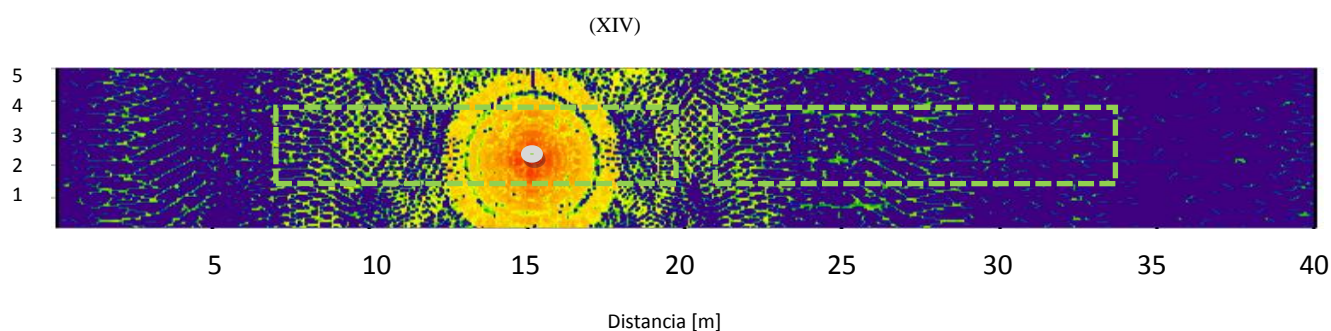
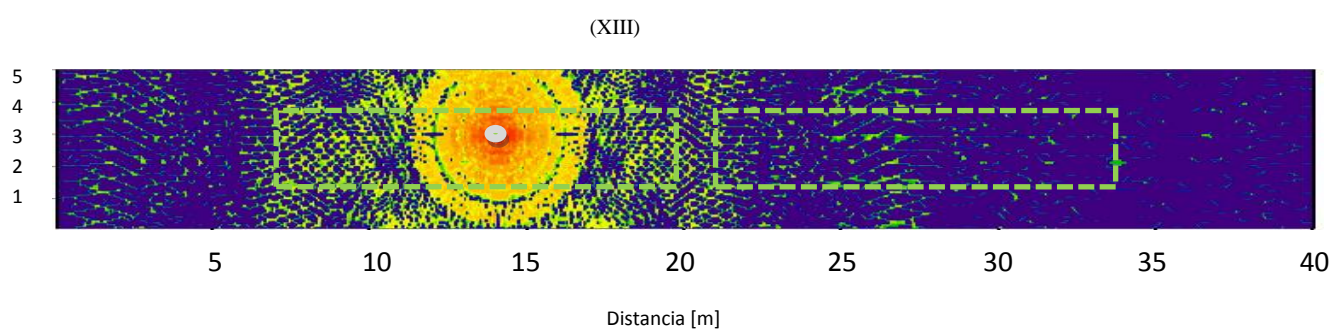
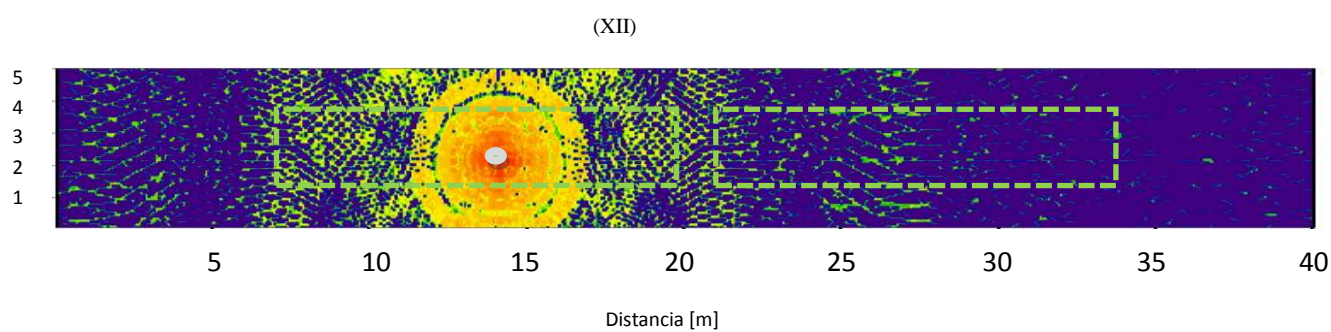
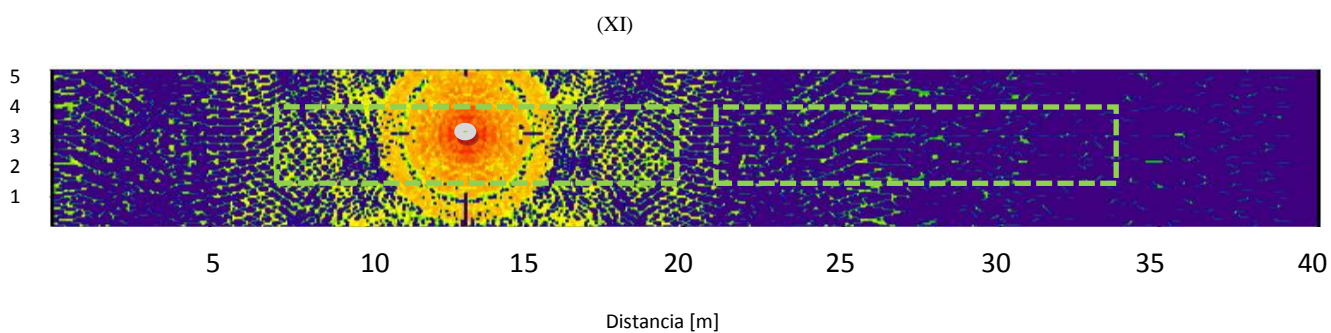
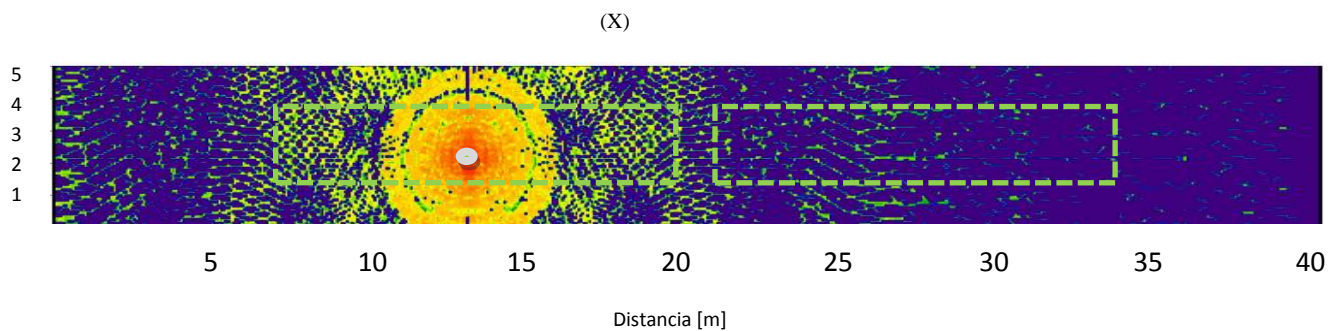


Fig. 101. Potencia recibida (dBm) para la altura de 2.6 m para todas las ubicaciones del transceptor. El símbolo de color gris muestra donde quedaría colocado el transceptor sobre el plano bidimensional.

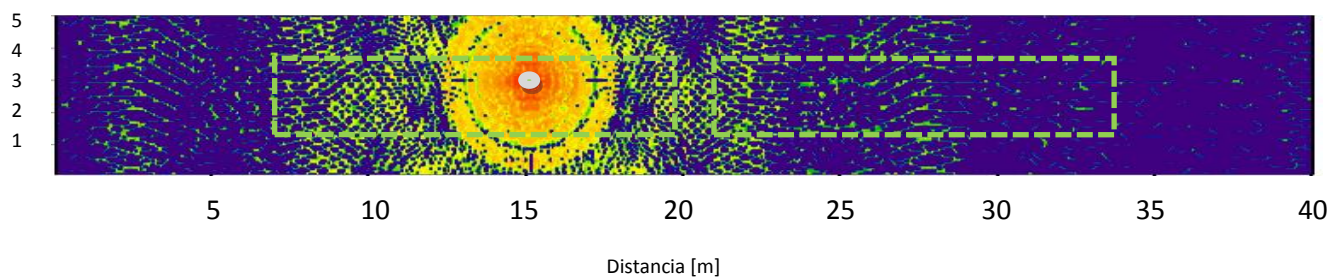
Planos bidimensionales de potencia recibida para la altura de 3 m



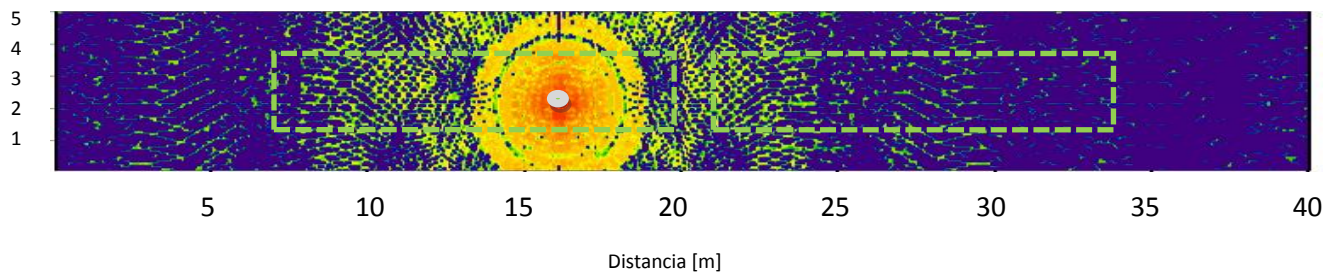




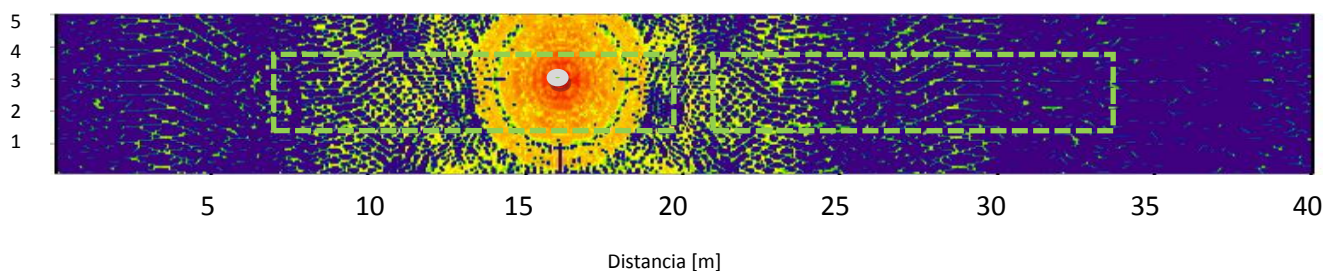
(XV)



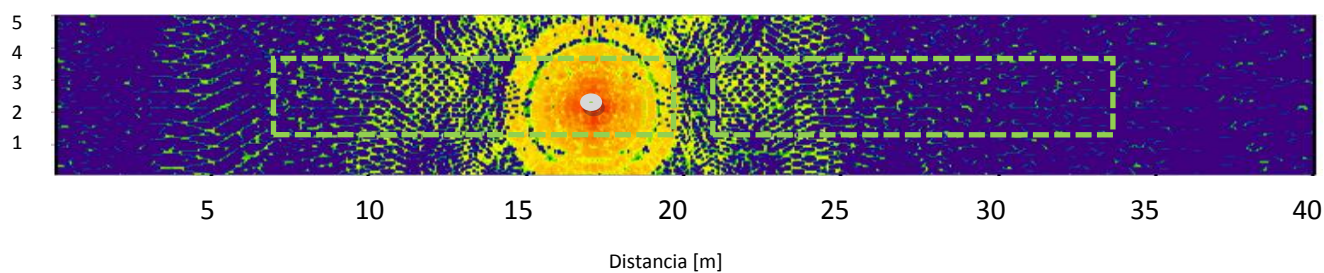
(XVI)



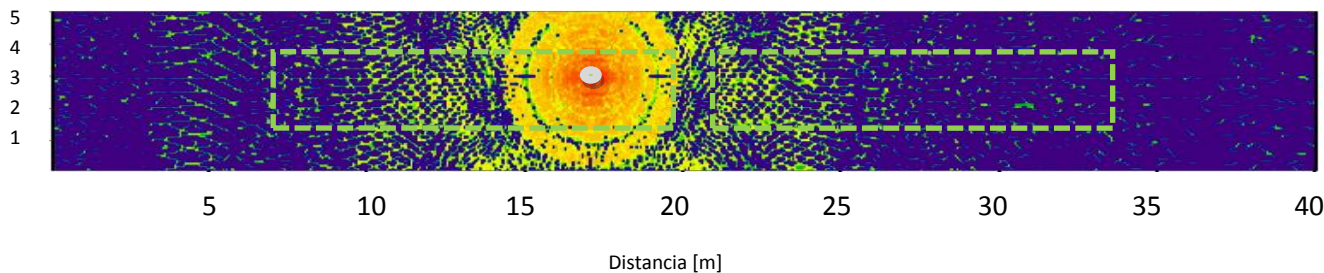
(XVII)



(XVIII)



(XIX)



(XX)

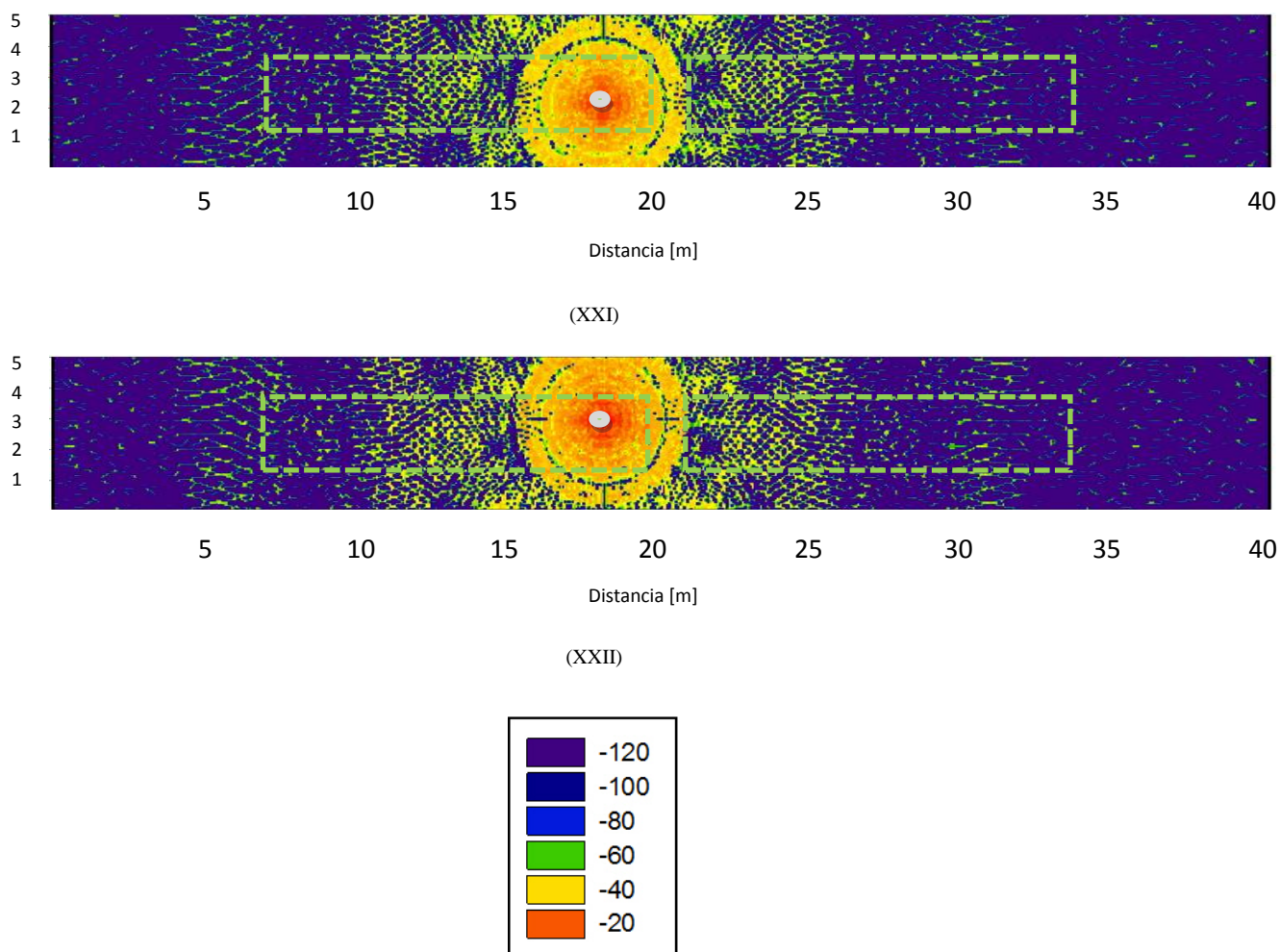
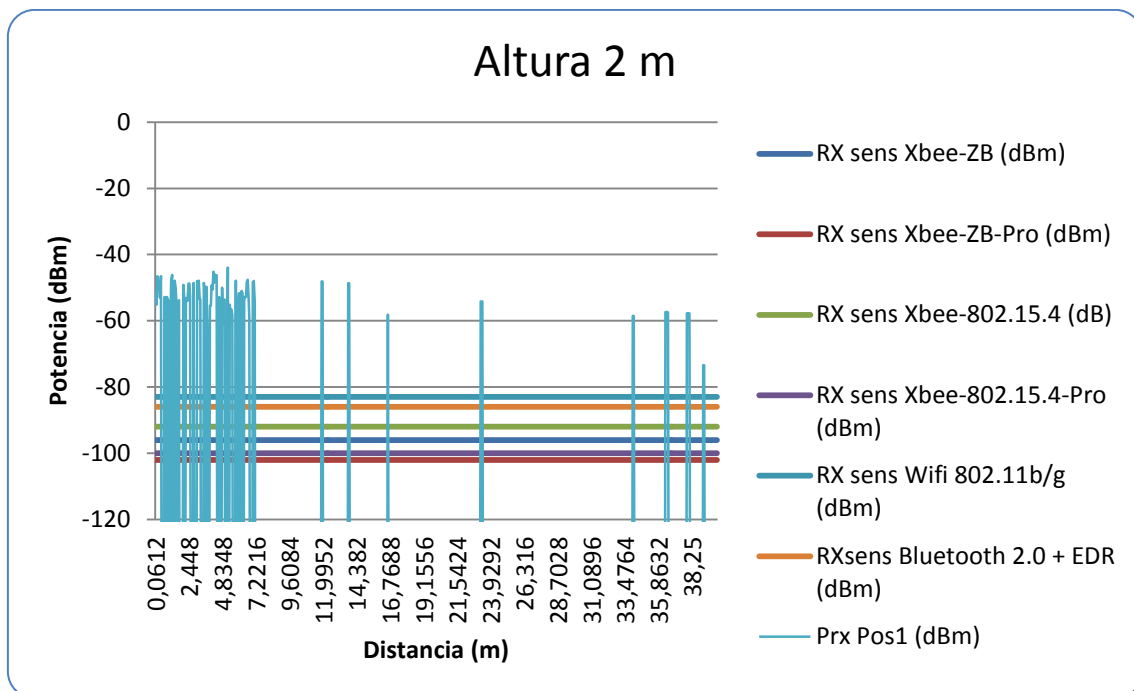
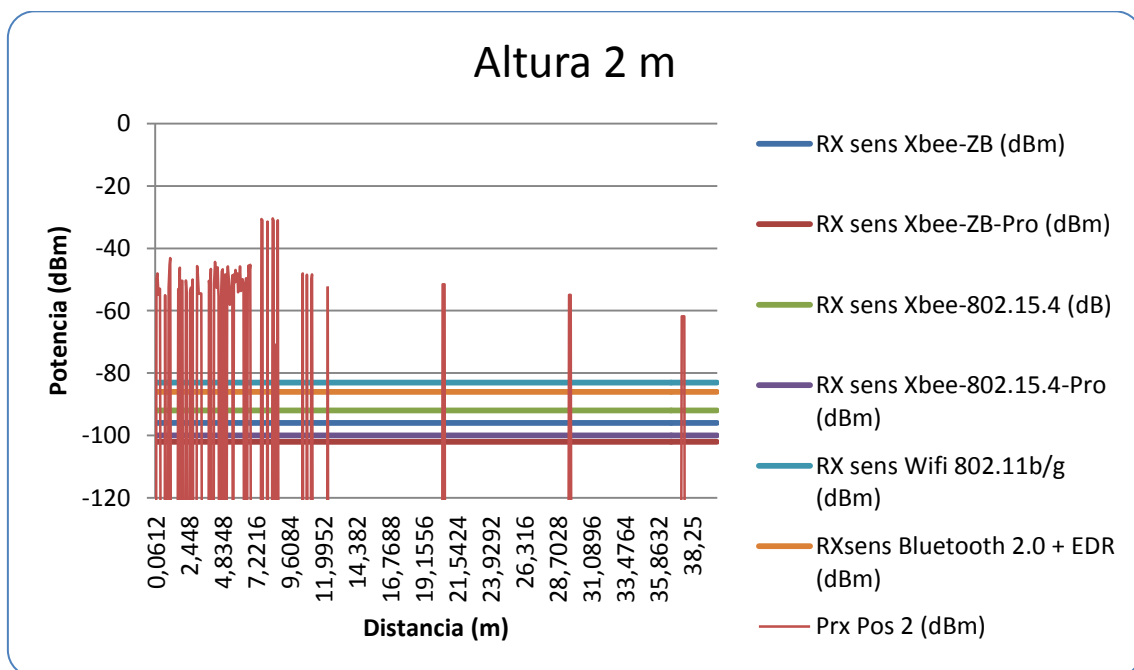


Fig. 102. Potencia recibida (dBm) para la altura de 3 m para las ubicaciones del transceptor. El símbolo de color gris muestra donde quedaría colocado el transceptor sobre el plano bidimensional.

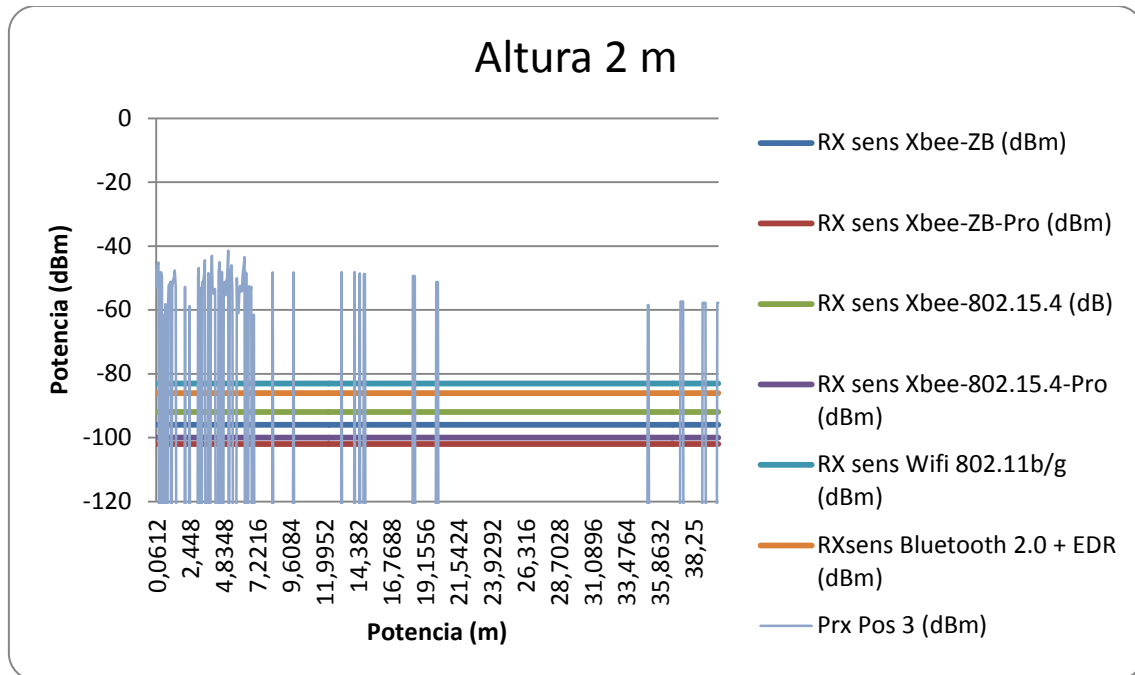
Radiales para la altura de 2 m



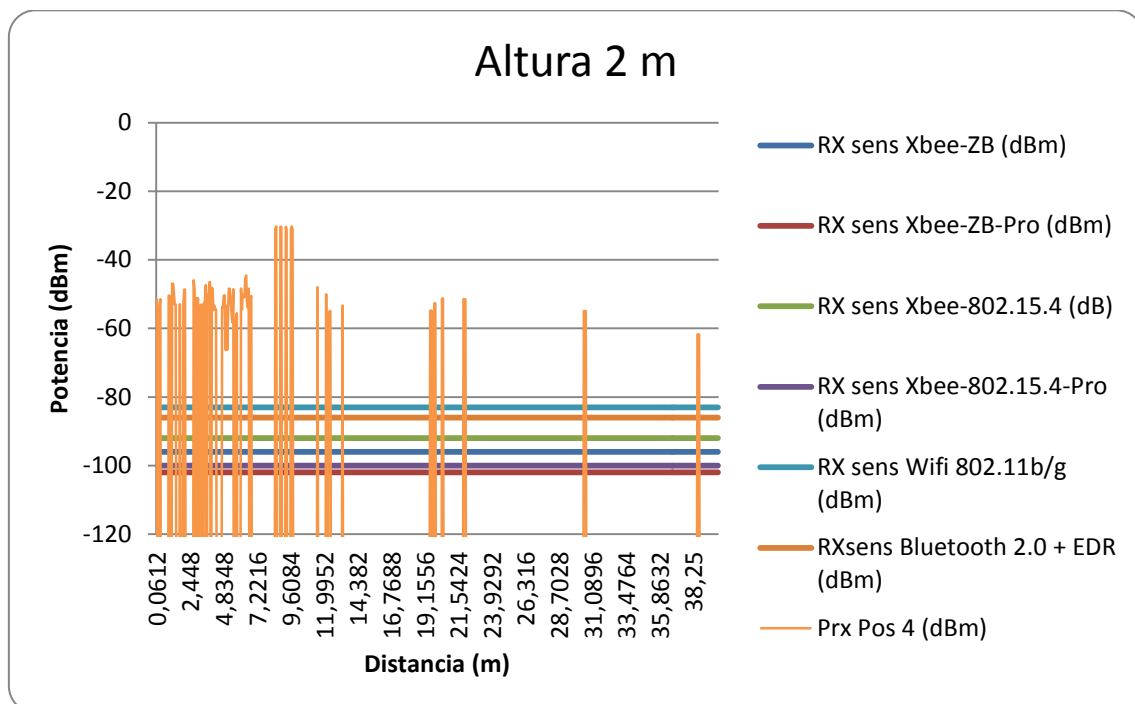
(I)



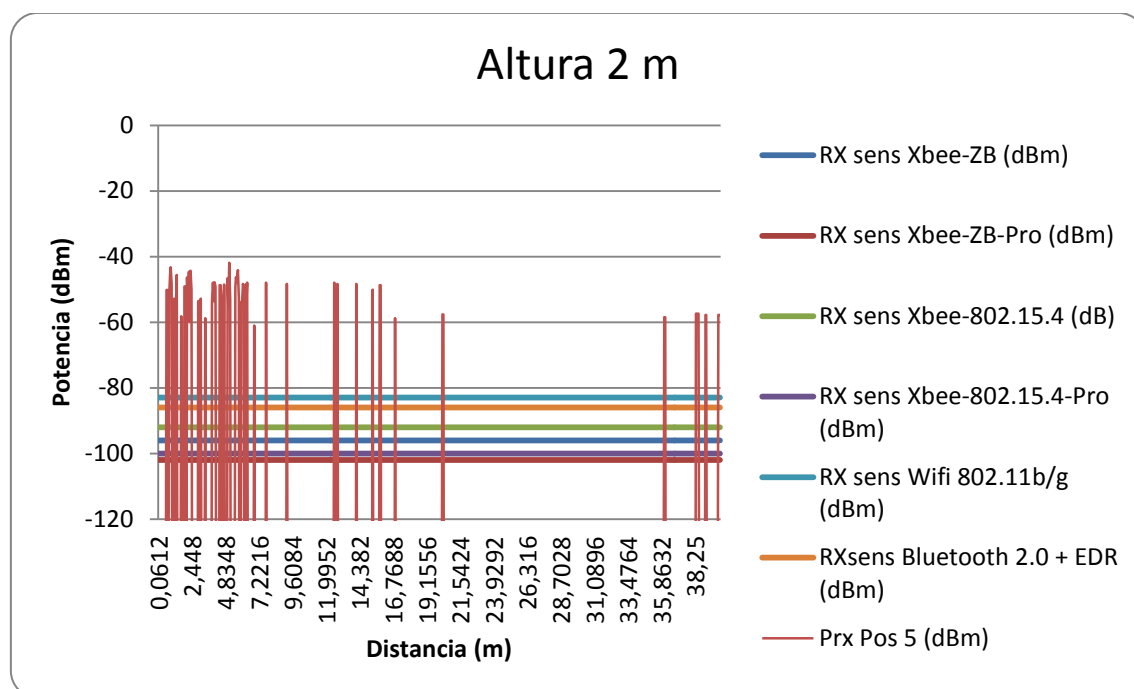
(II)



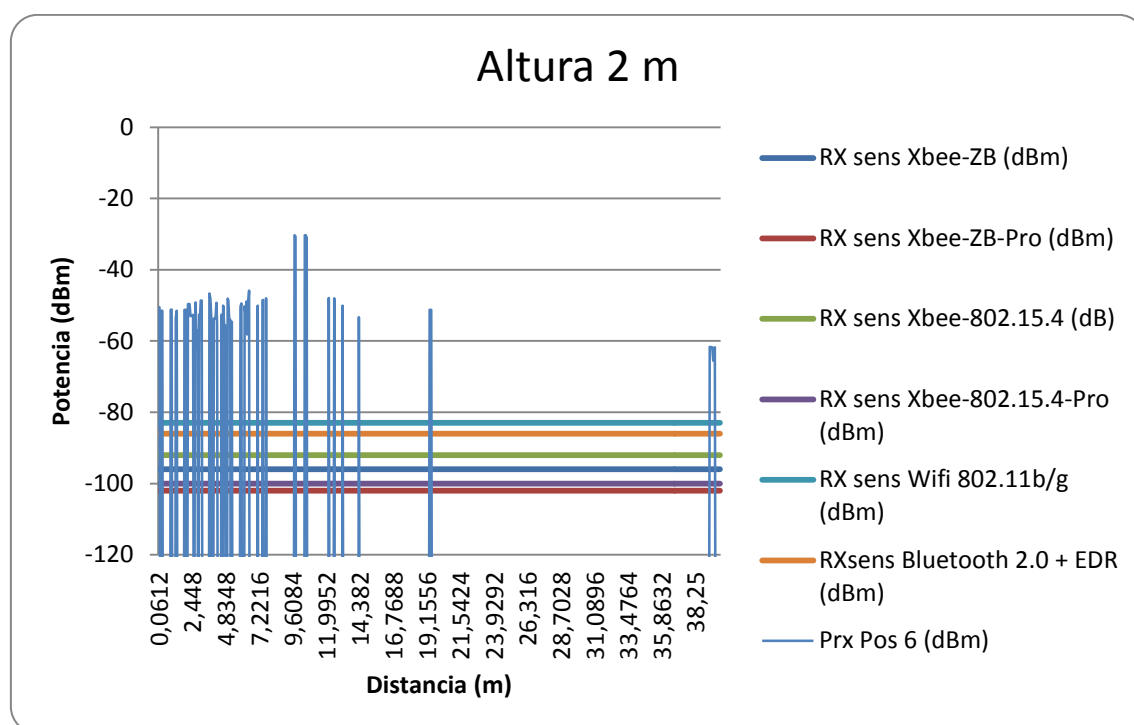
(III)



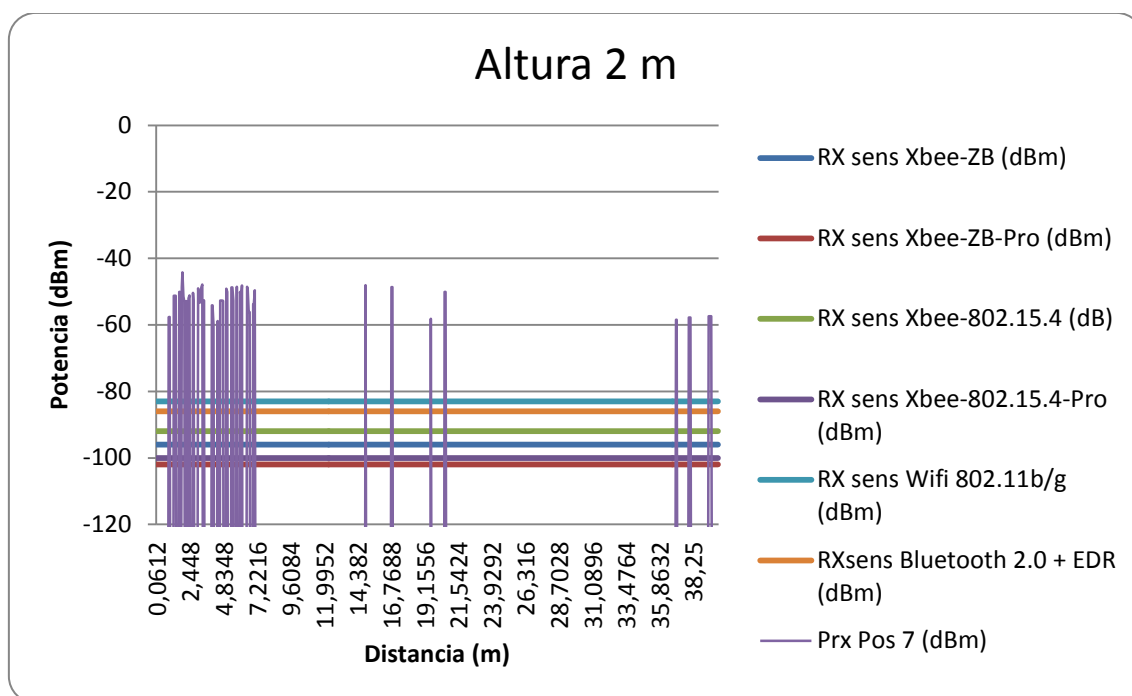
(IV)



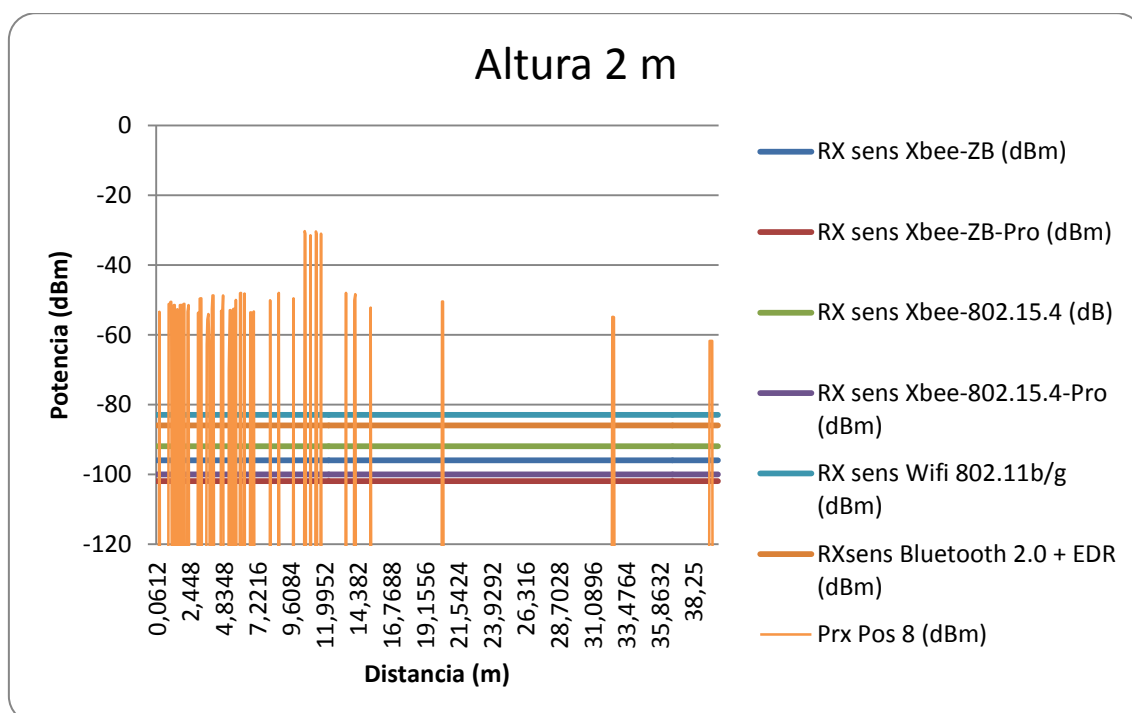
(V)



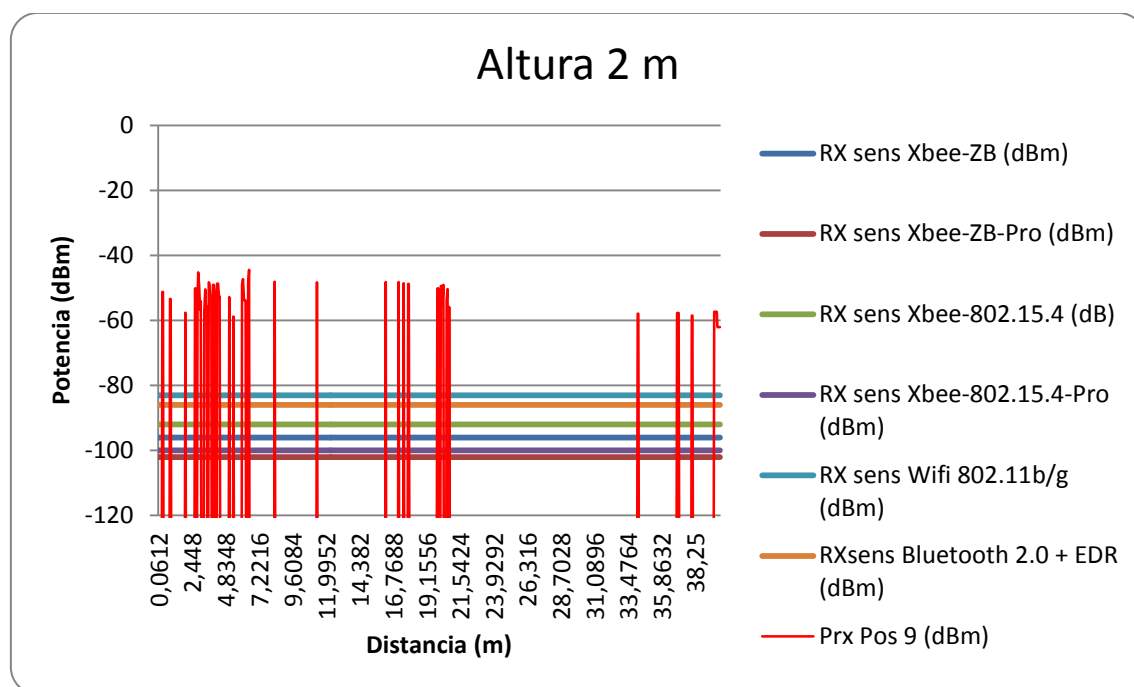
(VI)



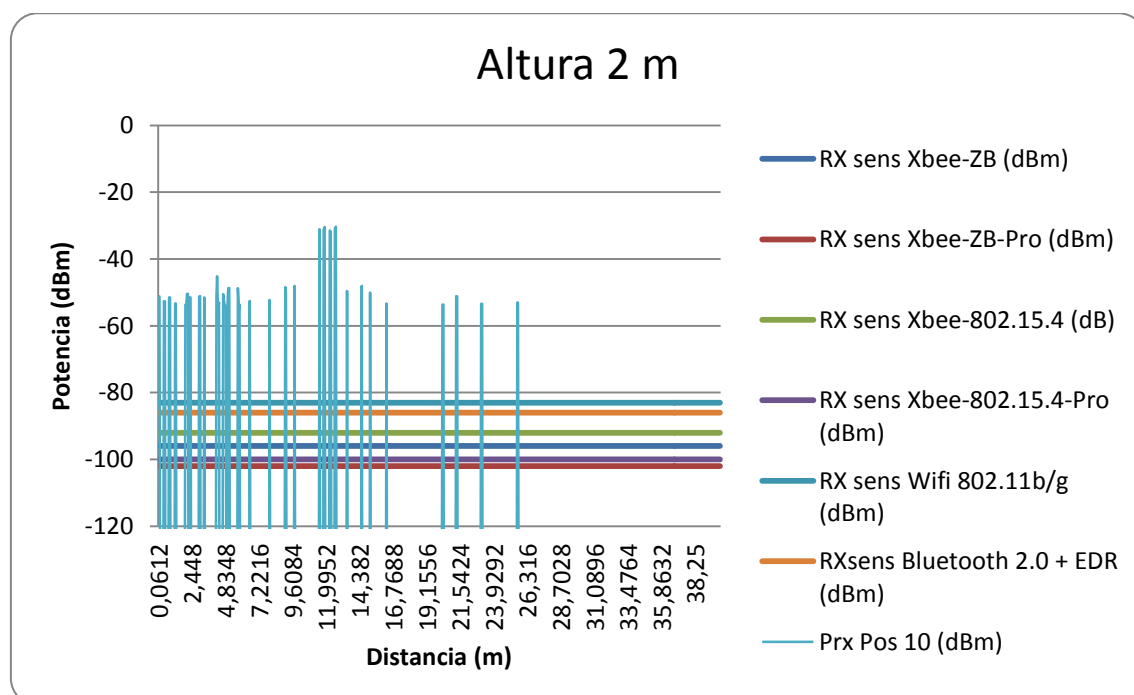
(VII)



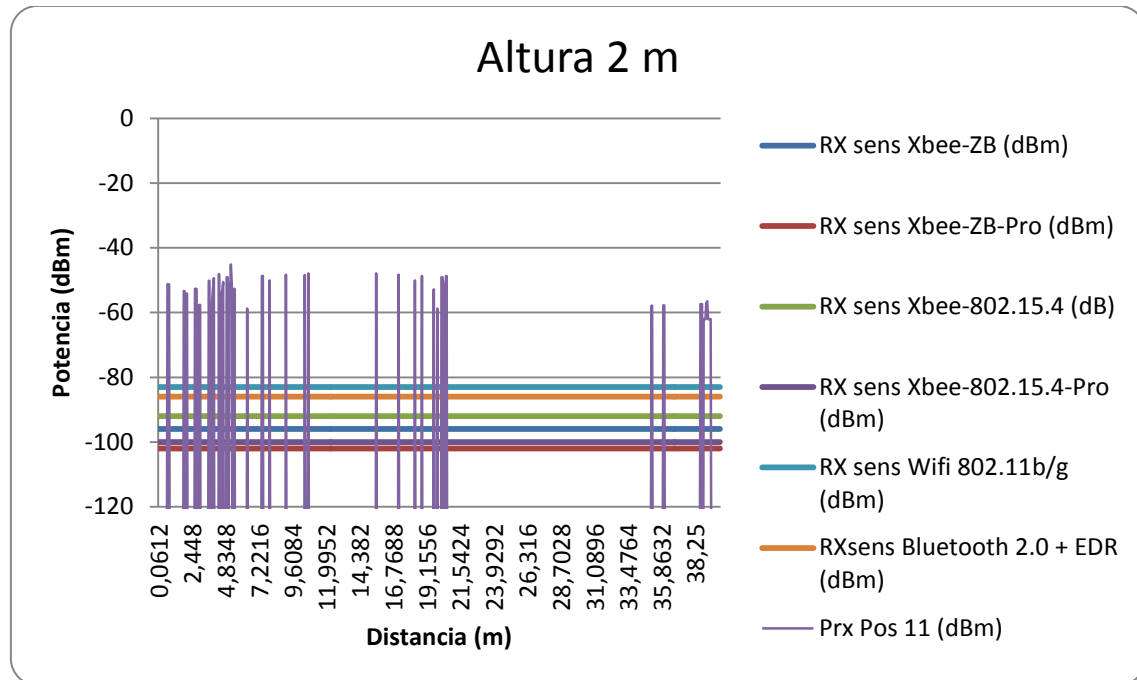
(VIII)



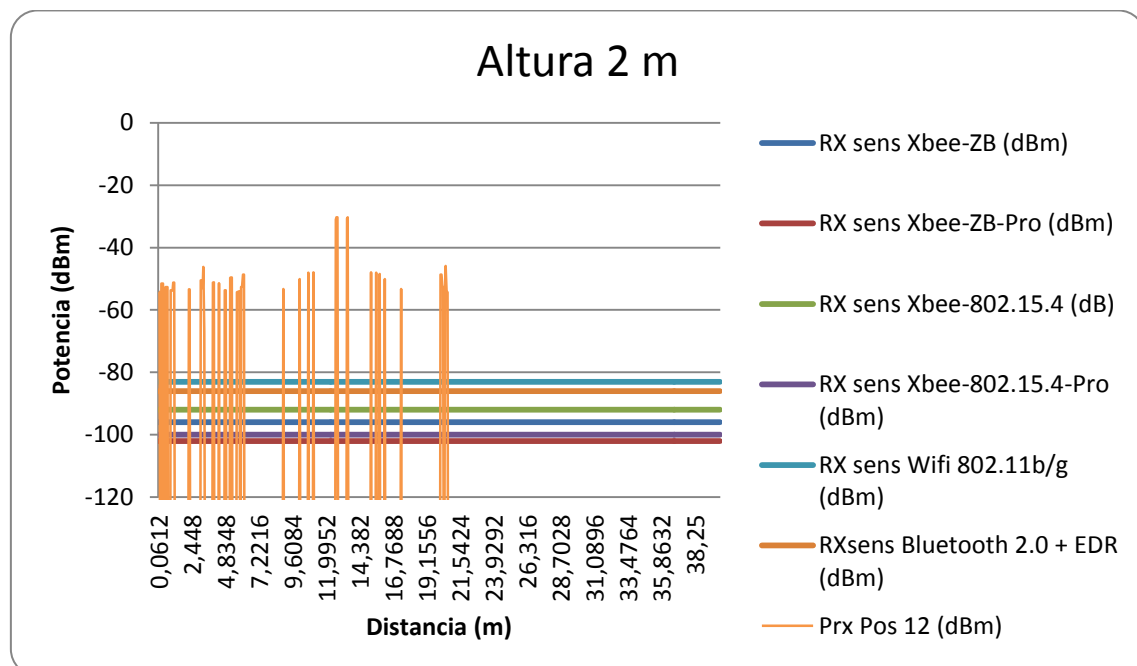
(IX)



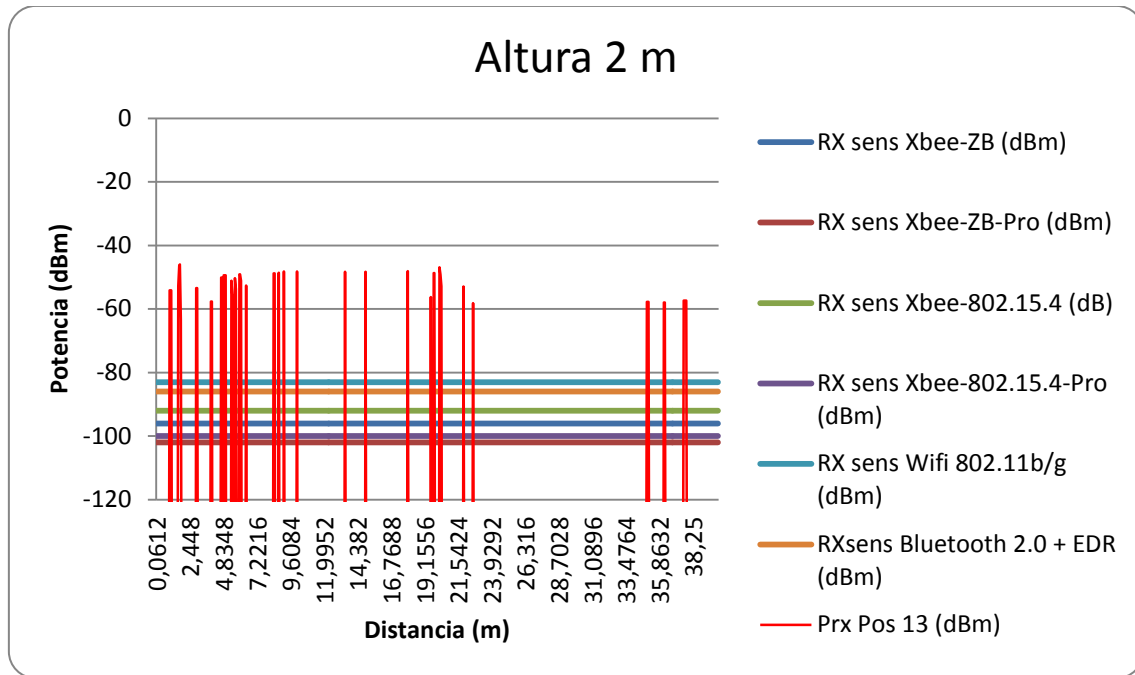
(X)



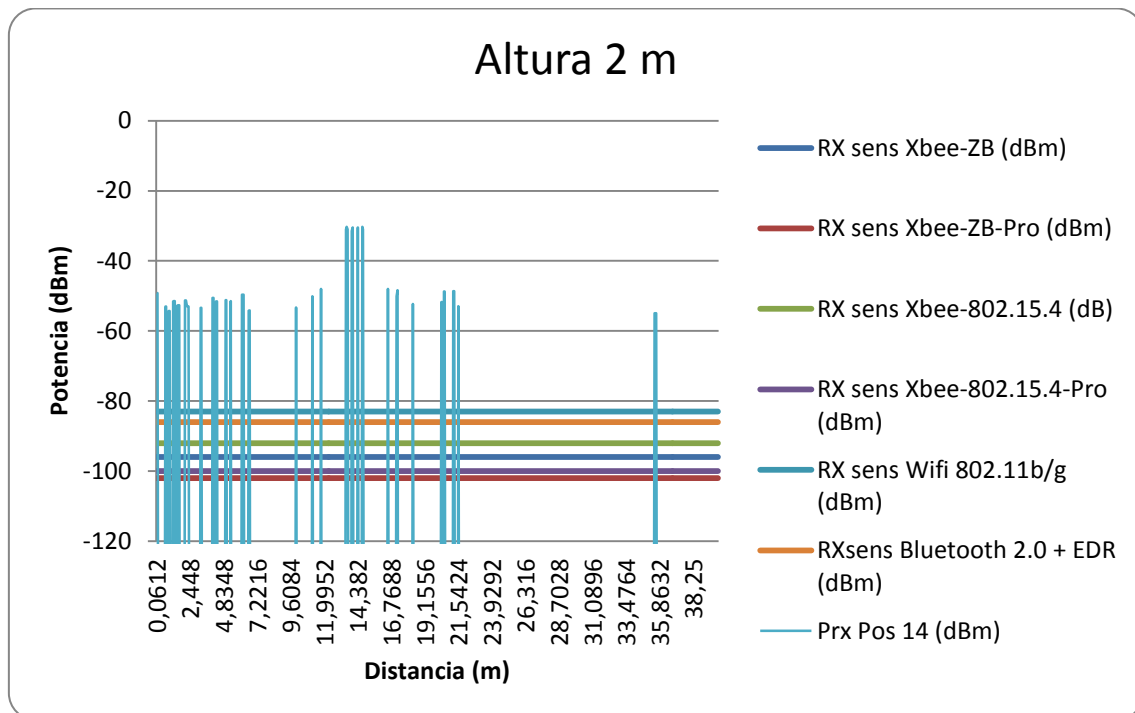
(XI)



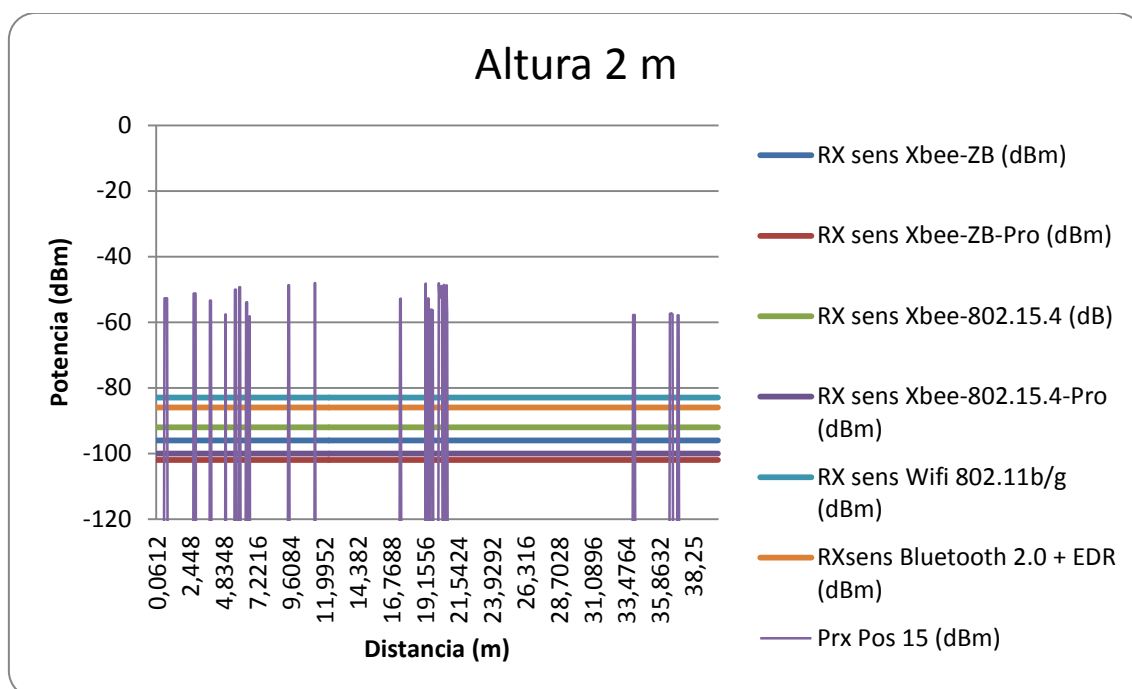
(XII)



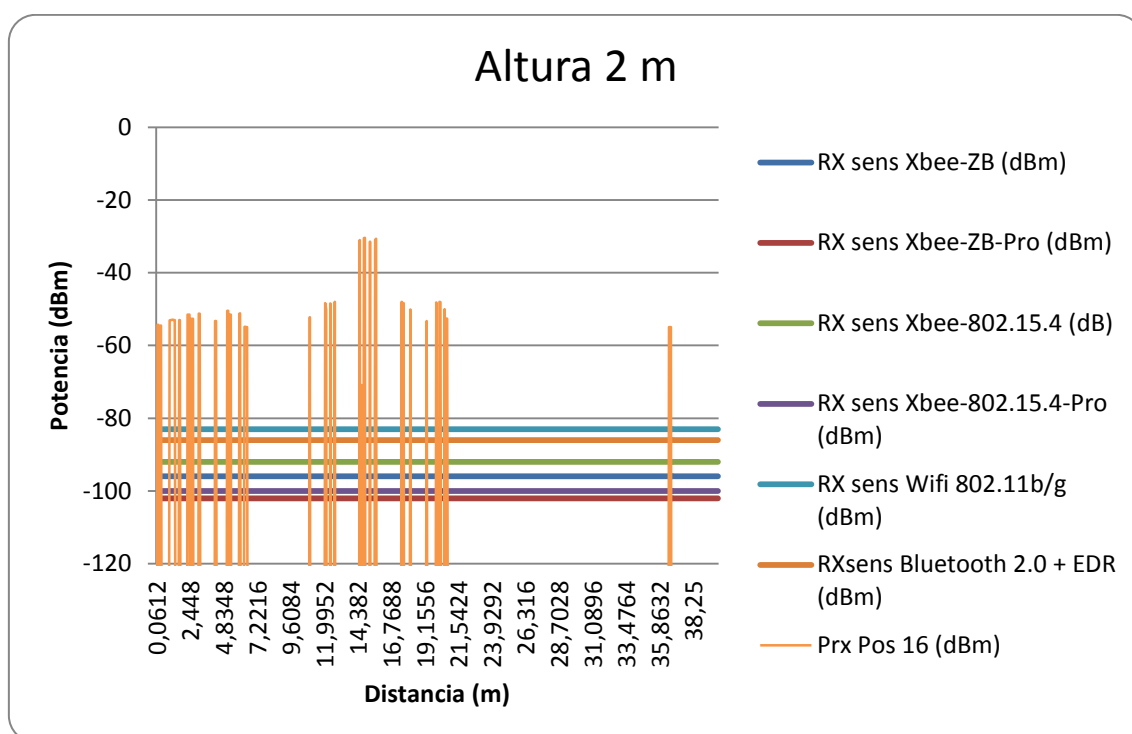
(XIII)



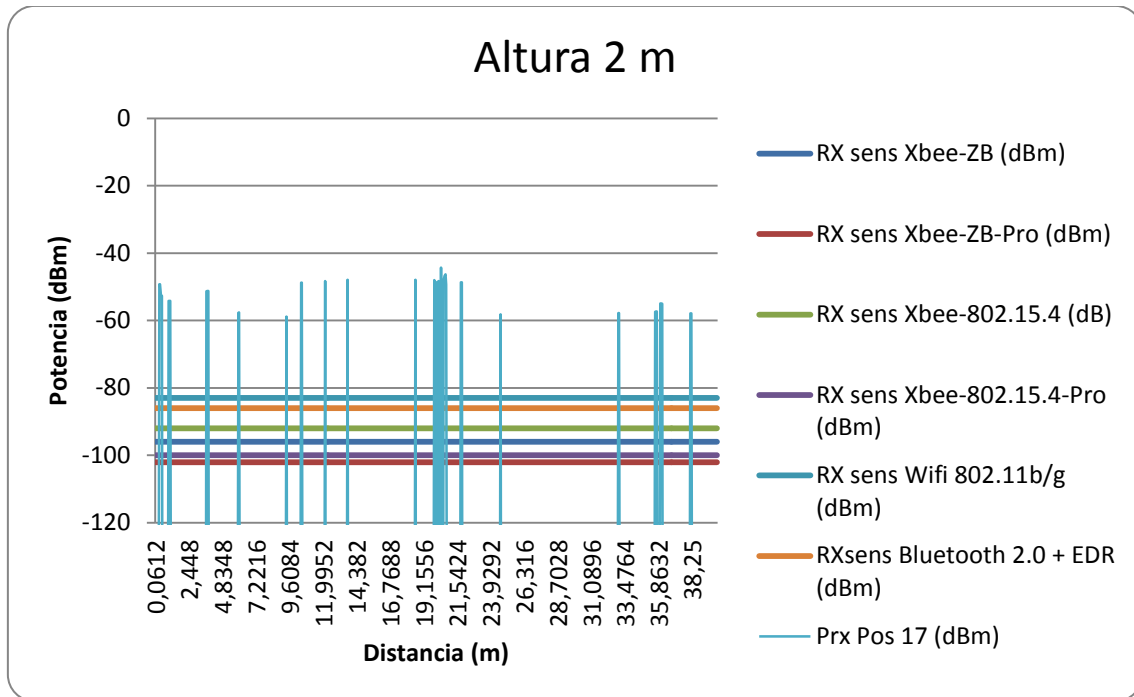
(XIV)



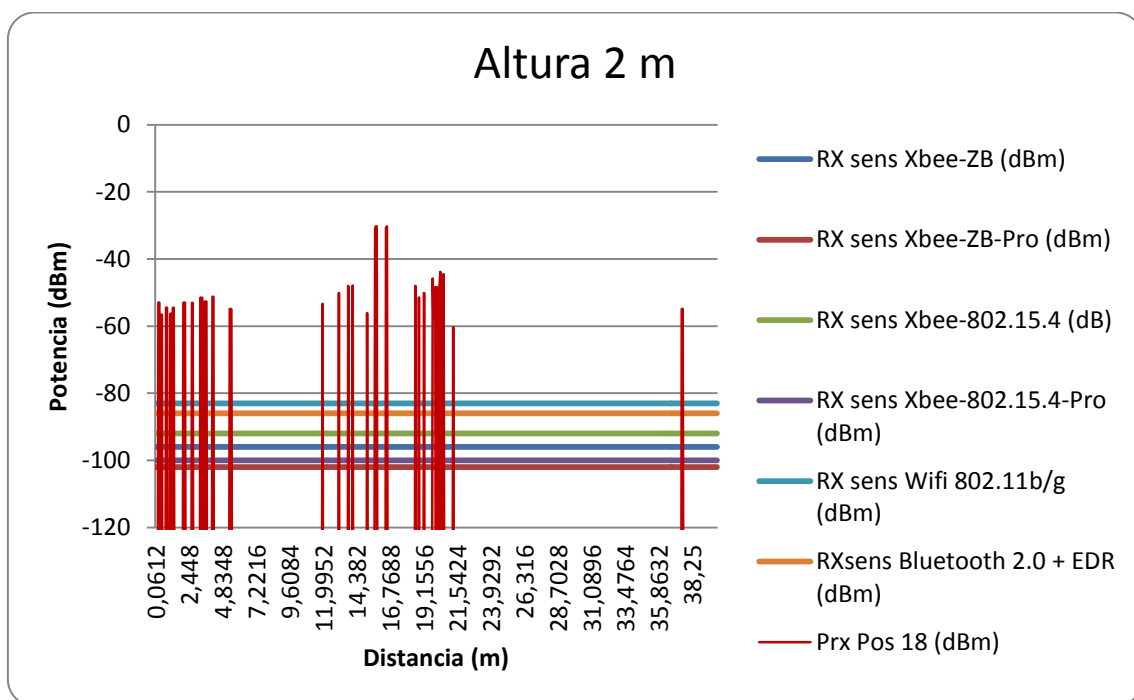
(XV)



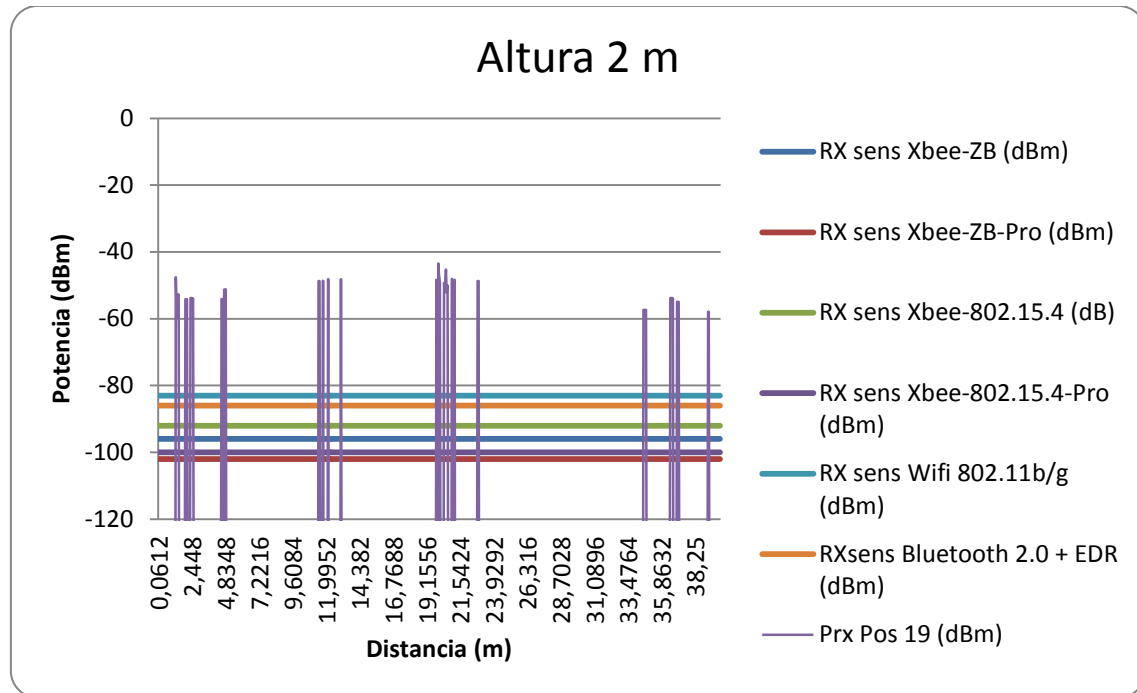
(XVI)



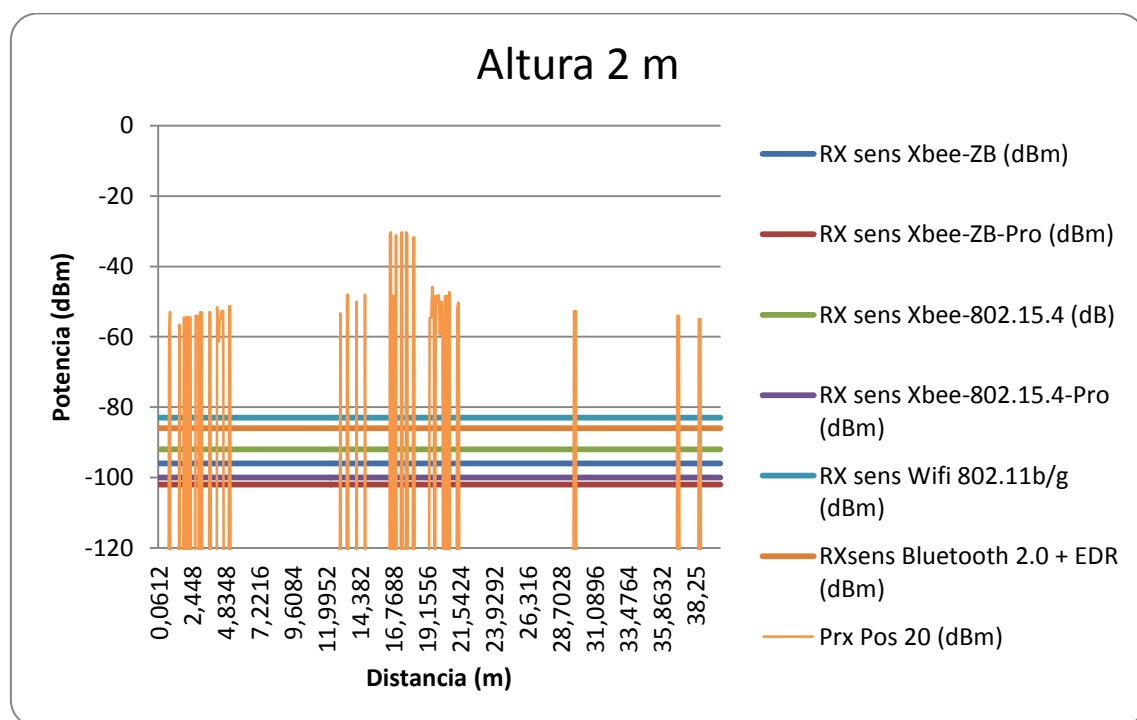
(XVII)



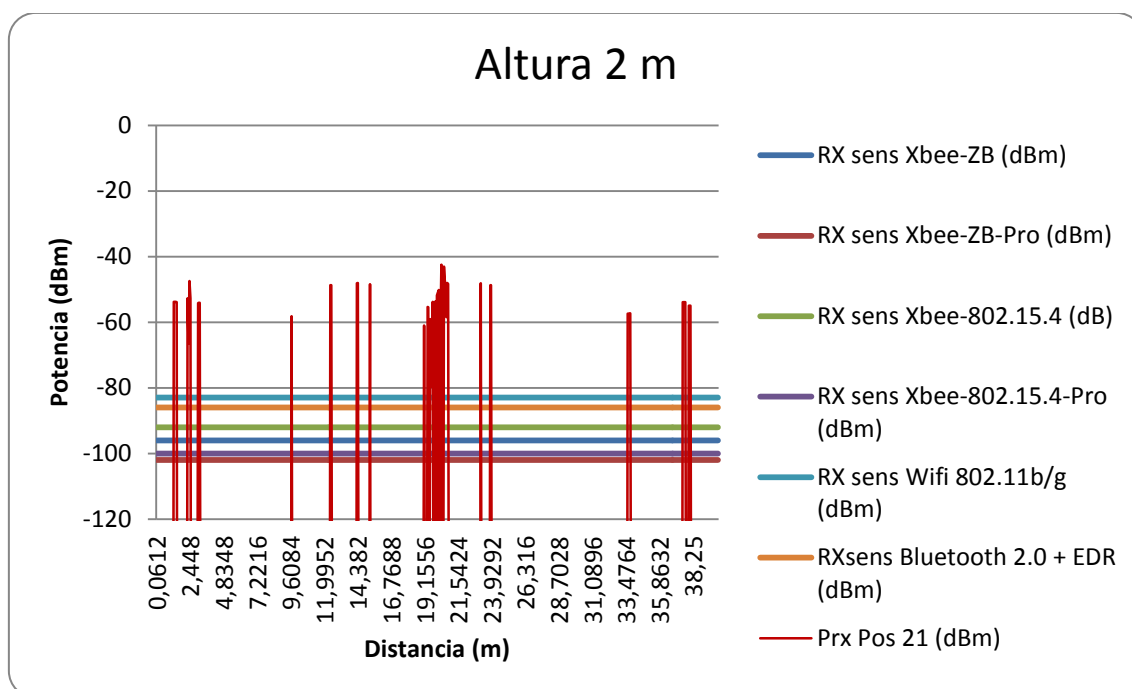
(XVIII)



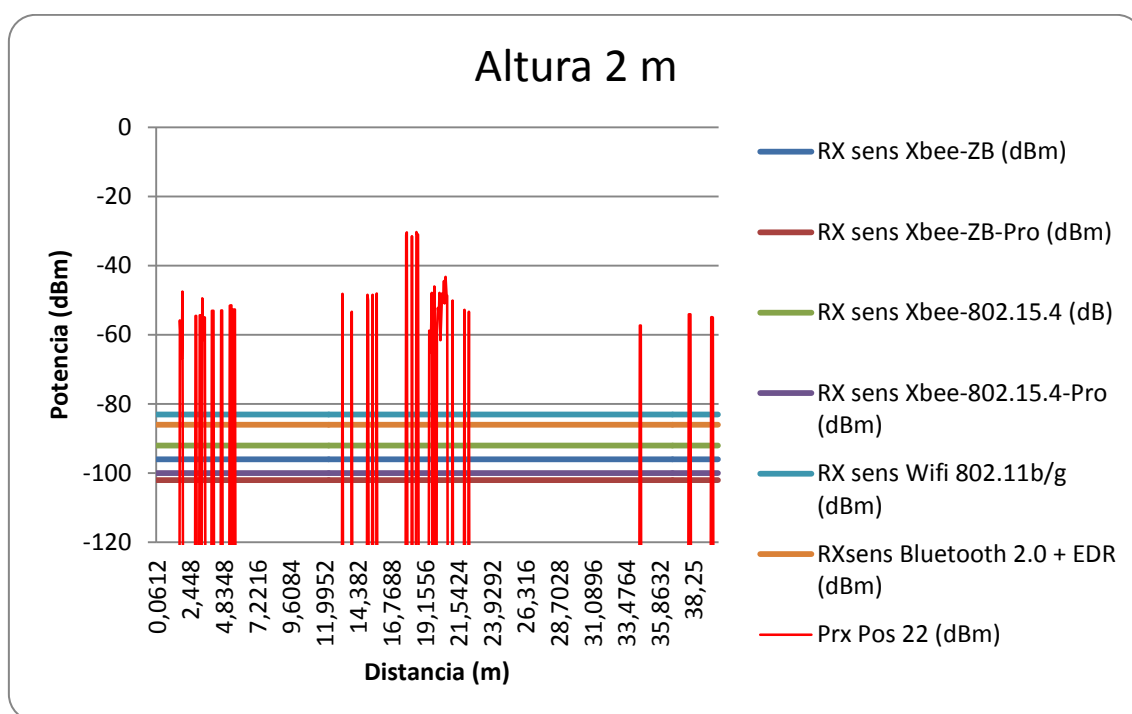
(XIX)



(XX)



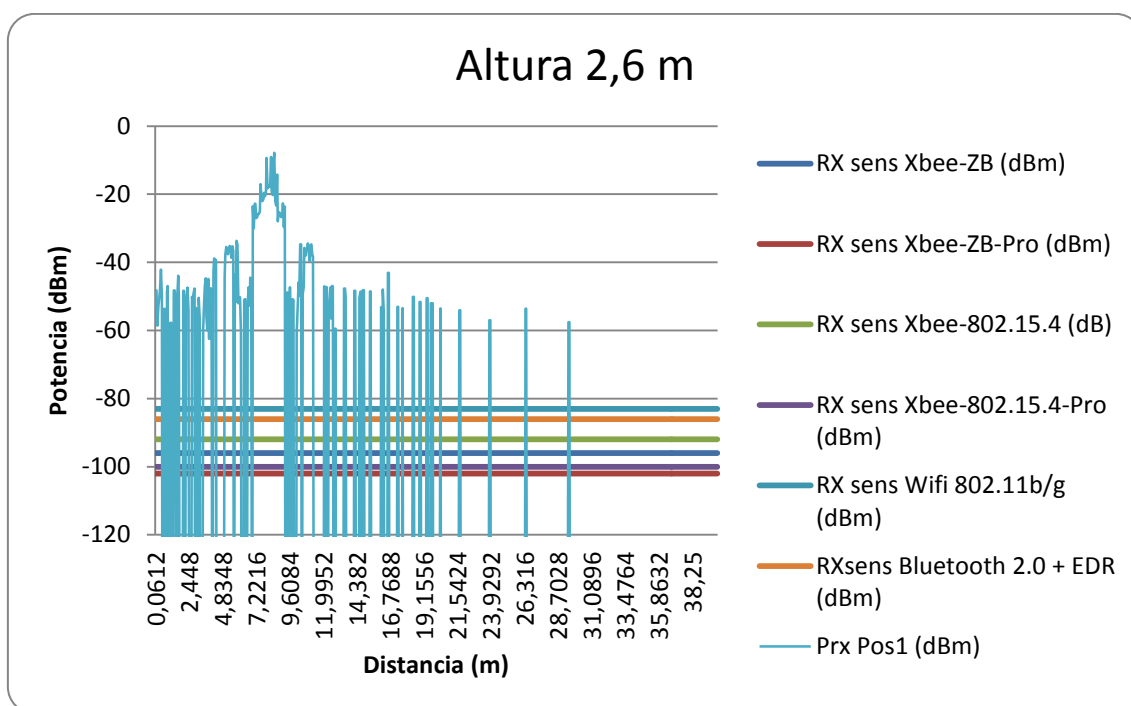
(XXI)



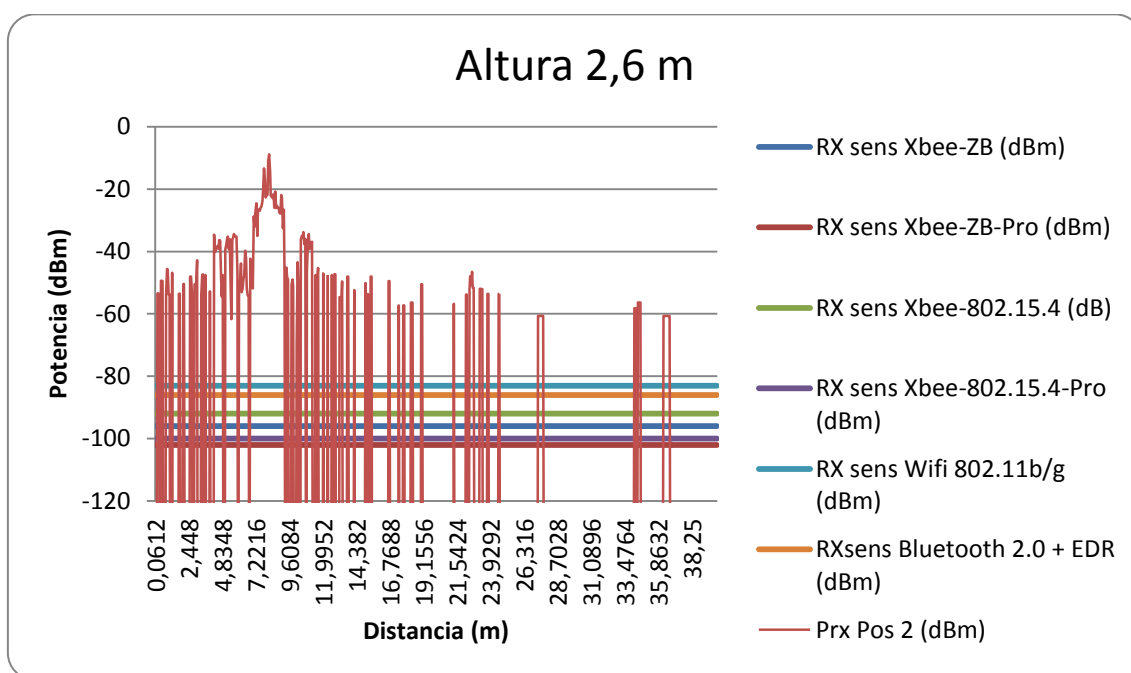
(XXII)

Fig. 103. Potencia recibida (dB) en función de la distancia (m) en la altura de 2 m para las diferentes ubicaciones de los transceptores para su comparación con la sensibilidad de motas de Libelium (protocolos ZigBee, Wifi y Bluetooth).

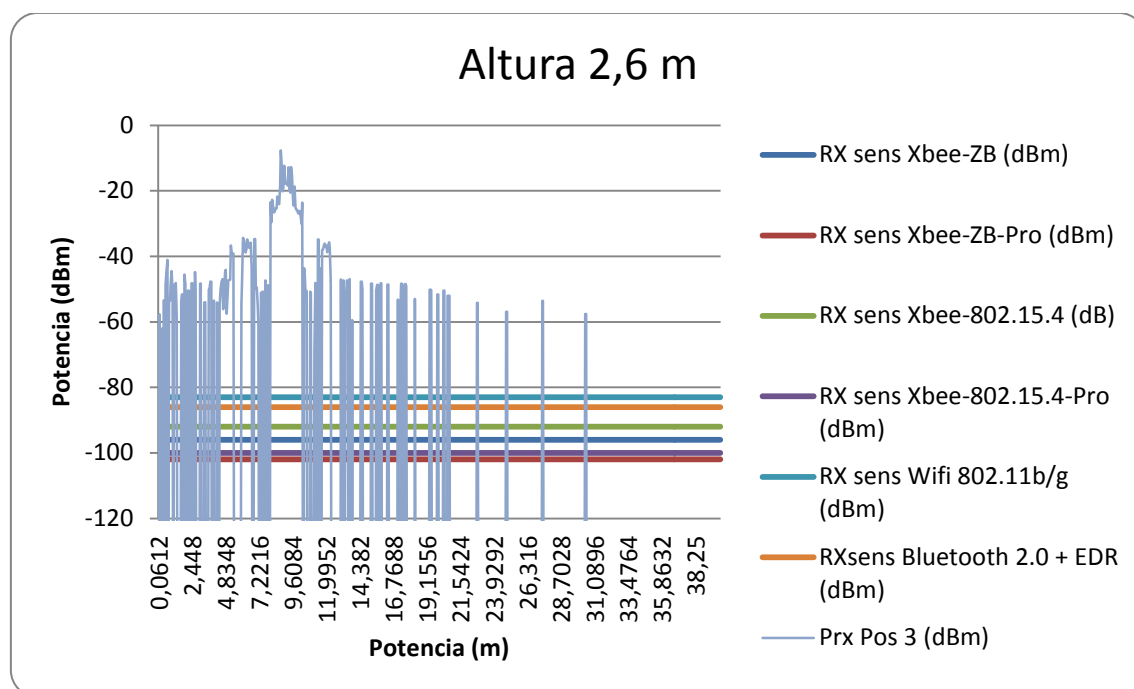
Radiales para la altura de 2.6 m



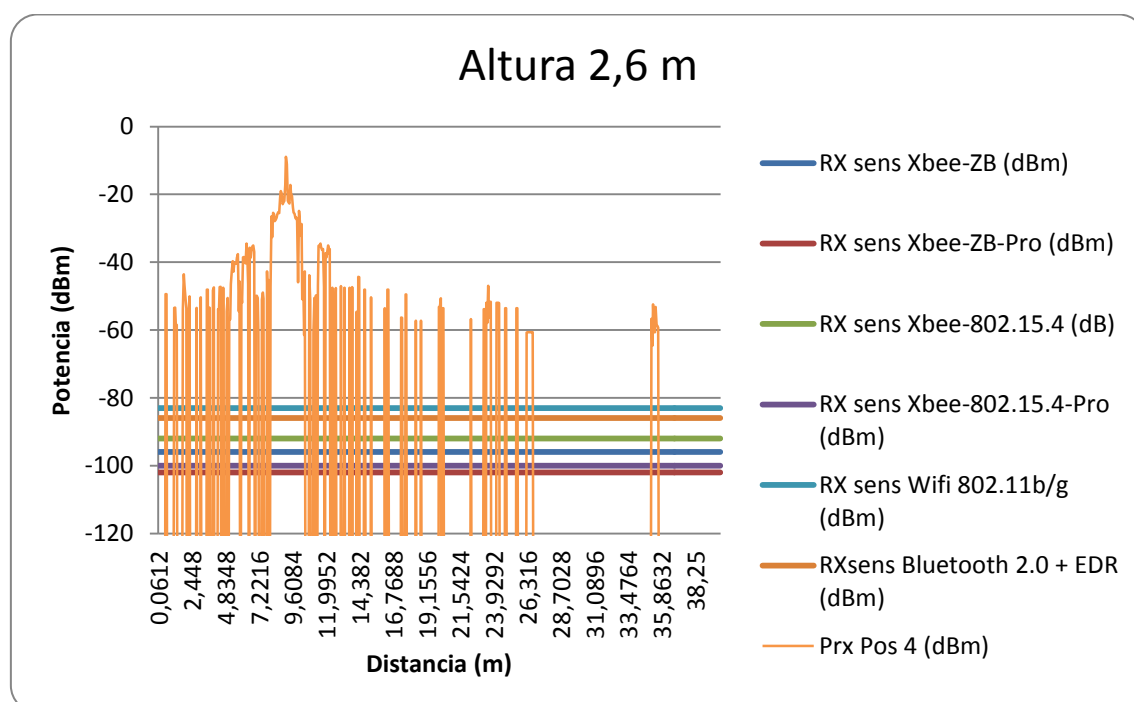
(I)



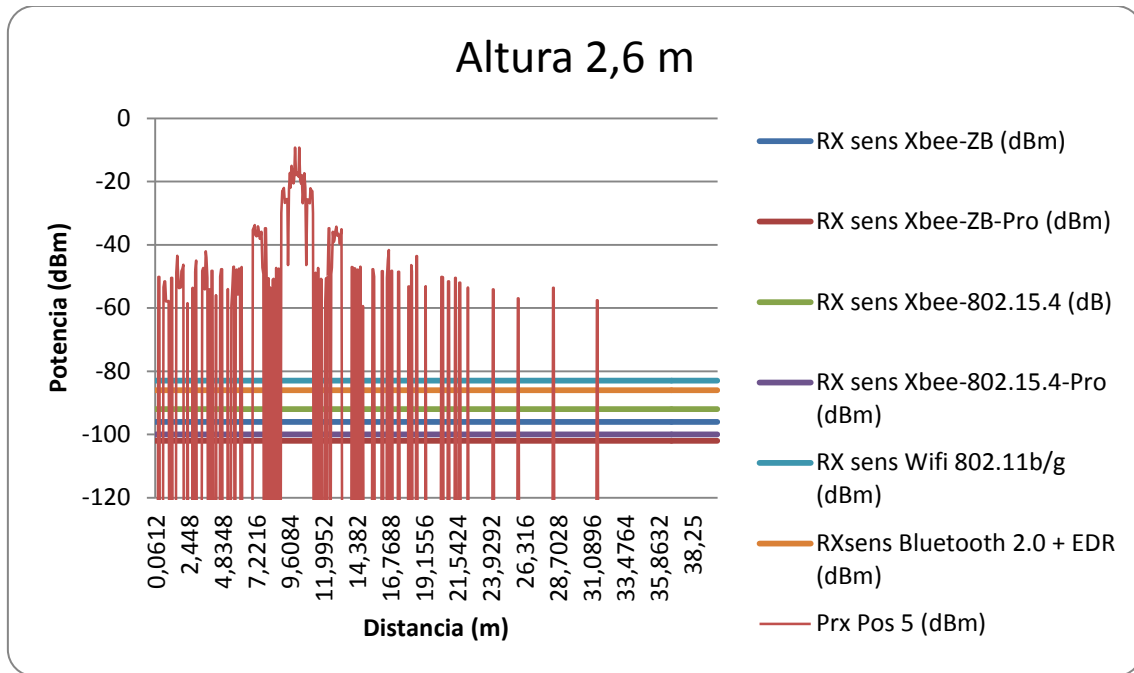
(II)



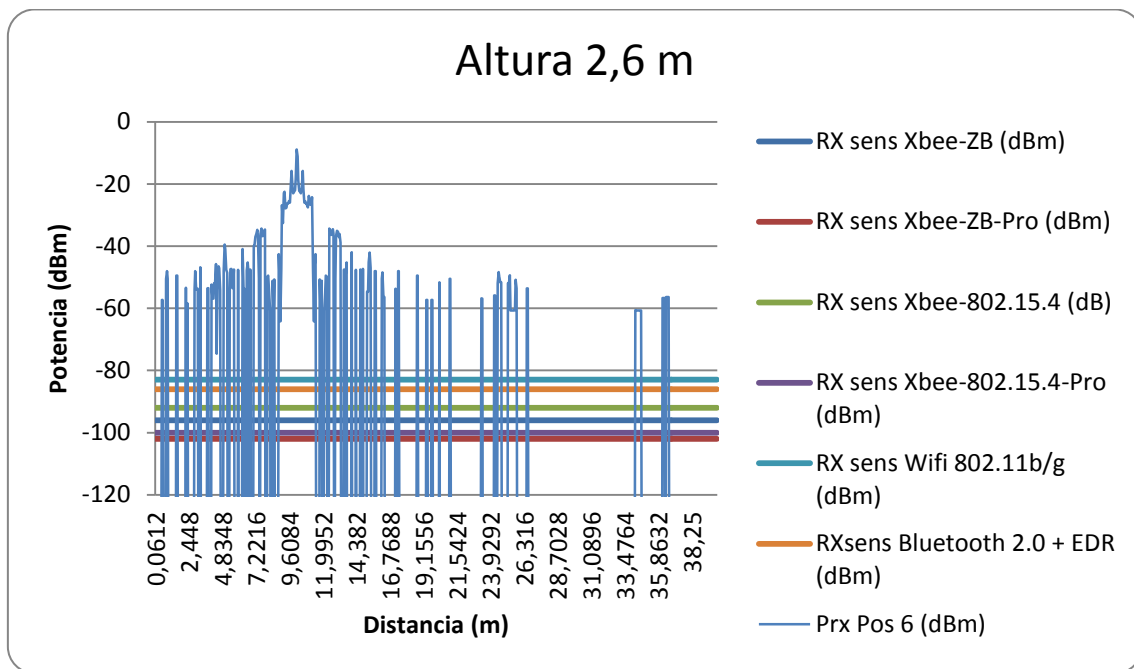
(III)



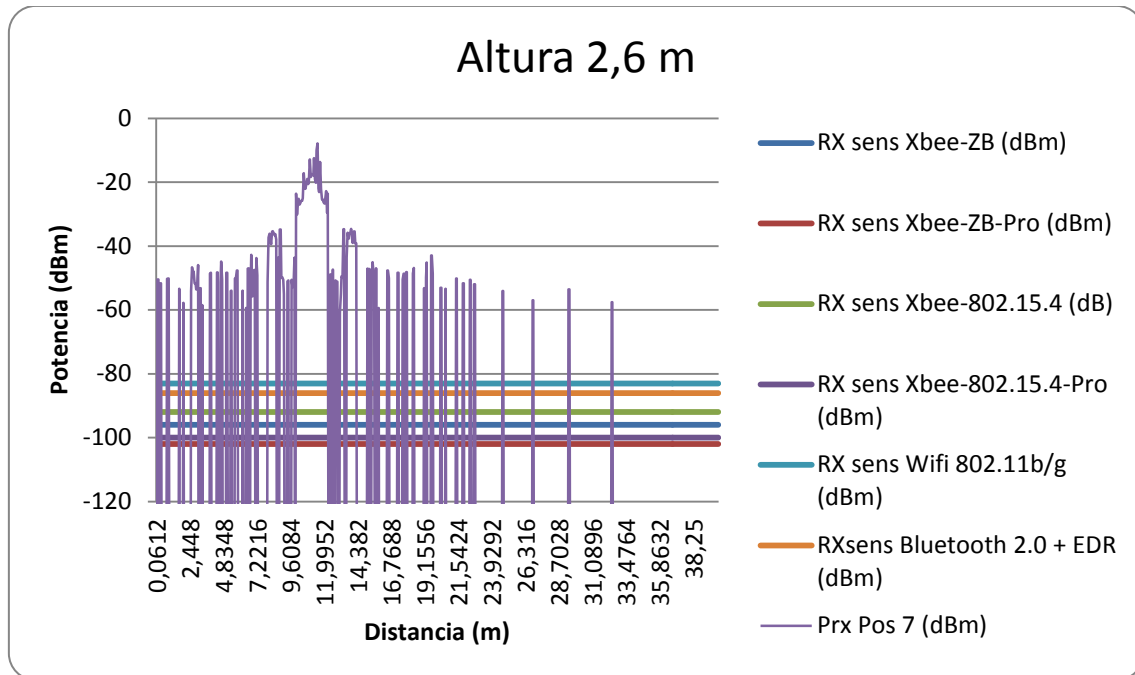
(IV)



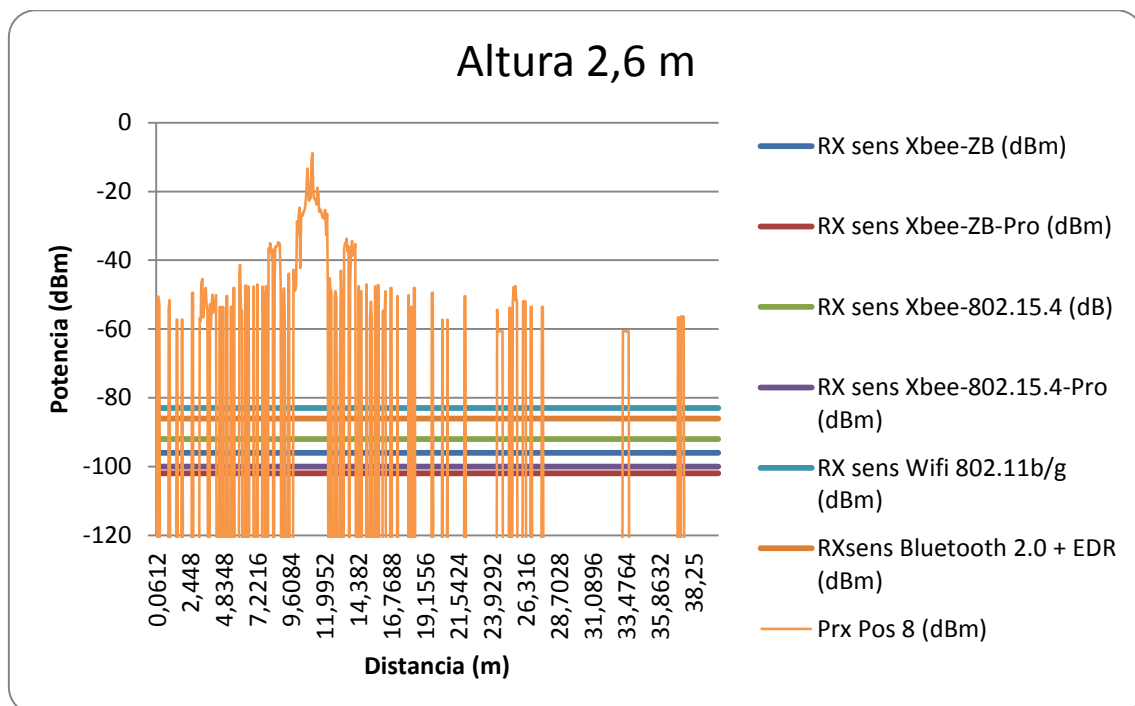
(V)



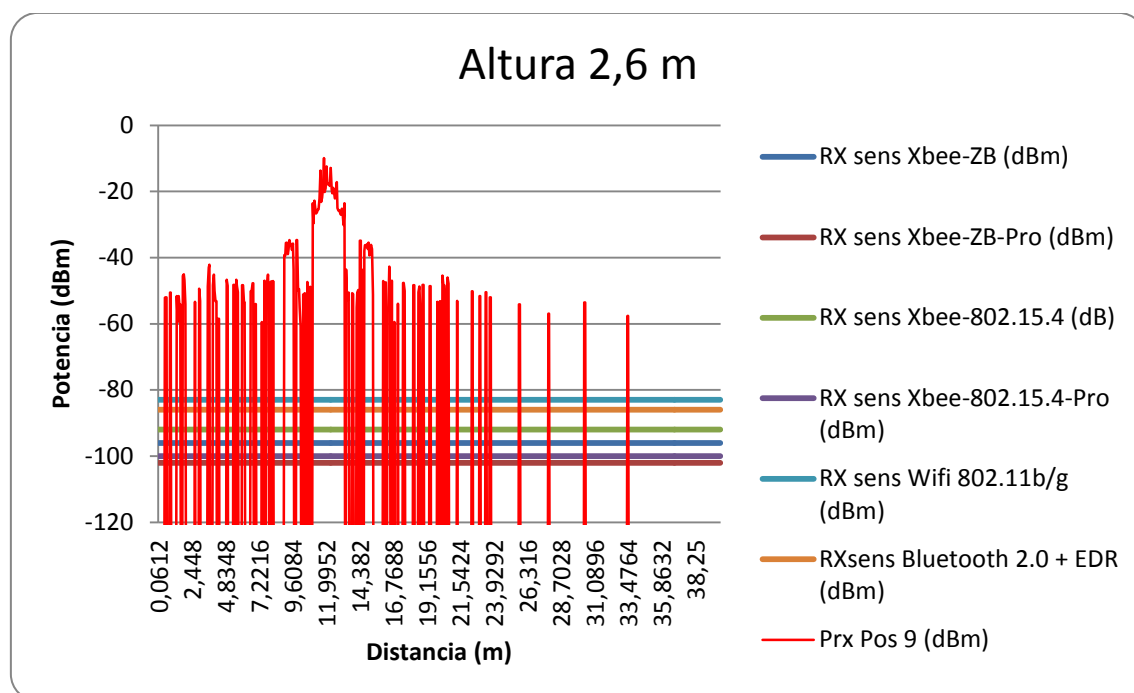
(VI)



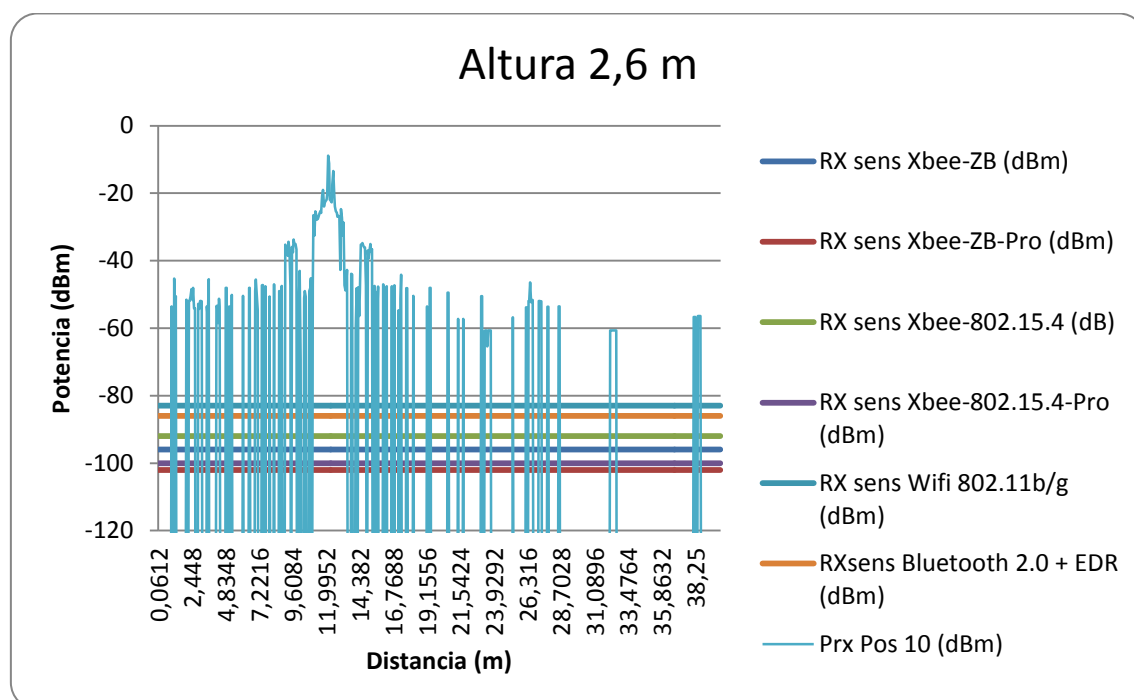
(VII)



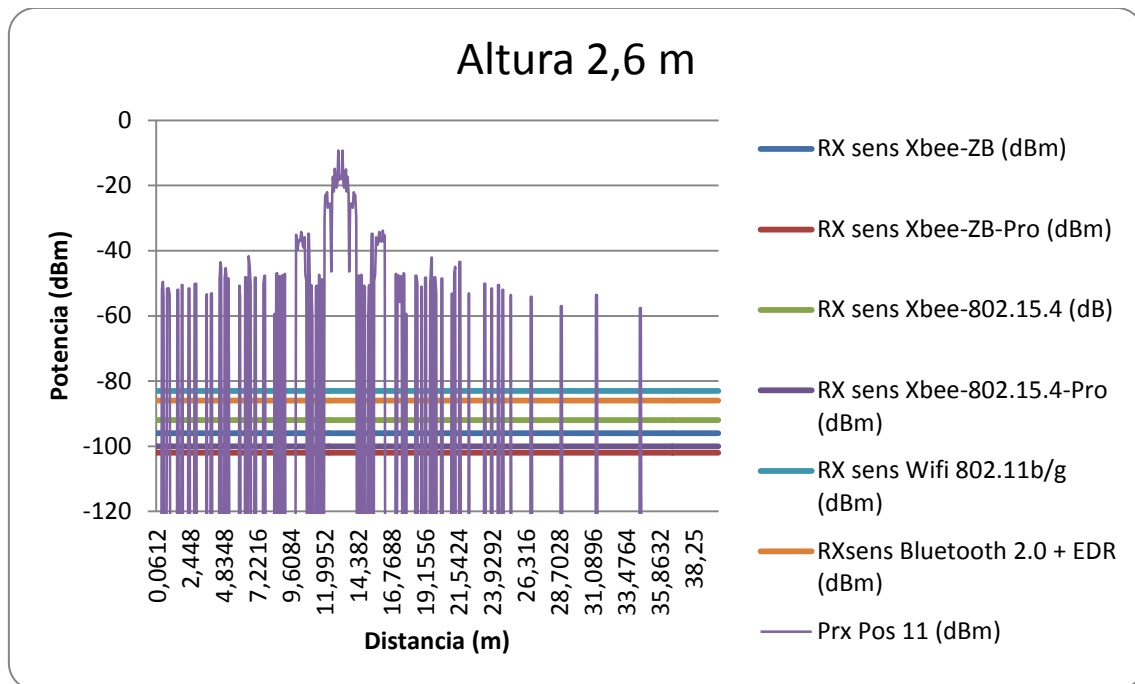
(VIII)



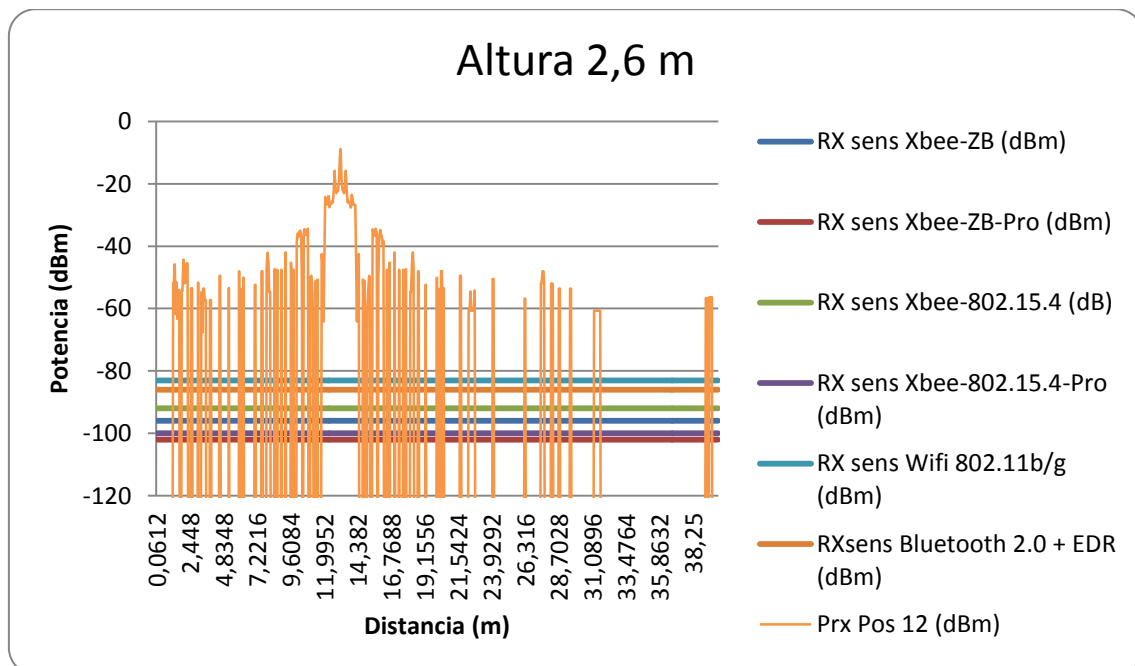
(IX)



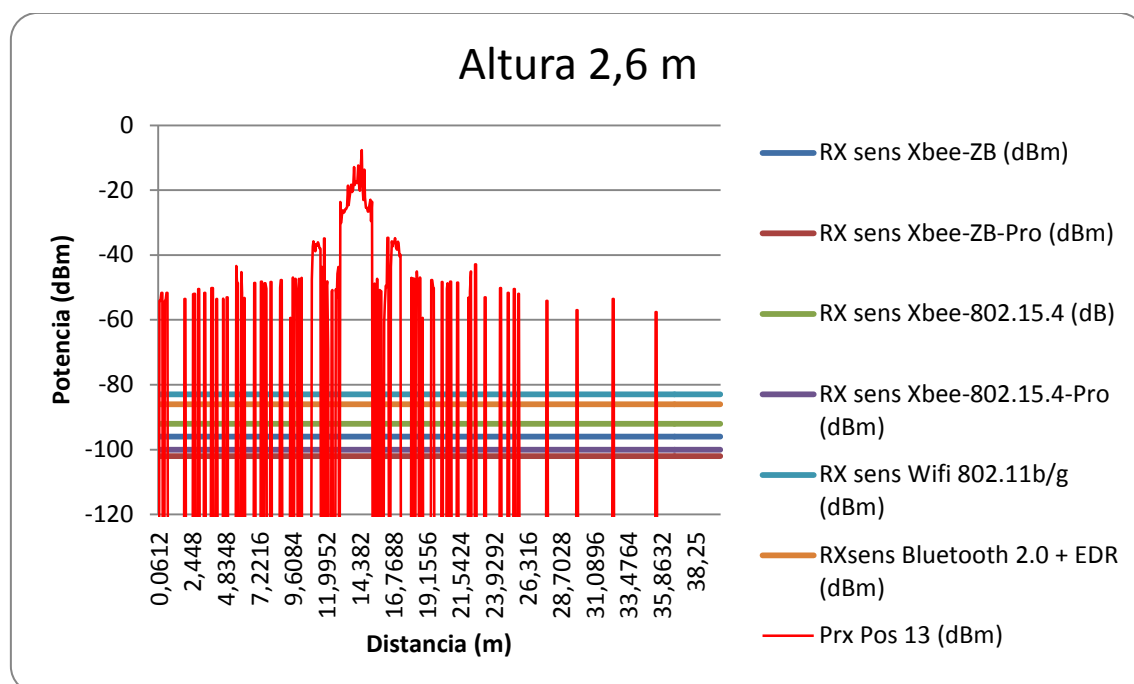
(X)



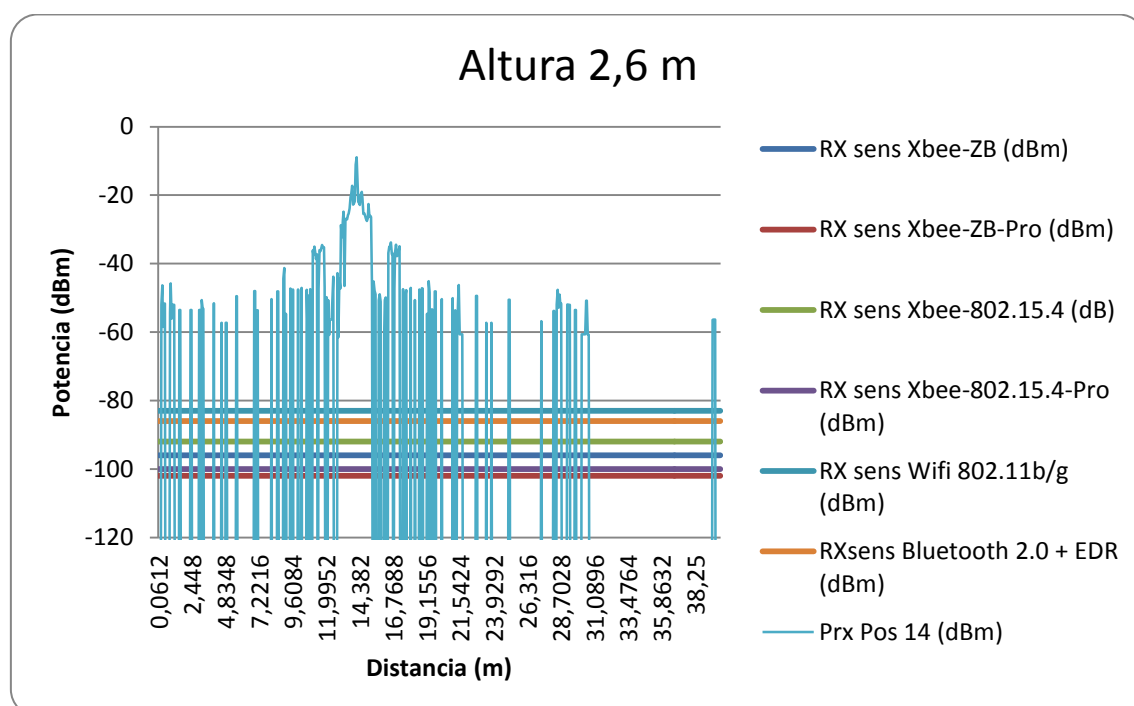
(XI)



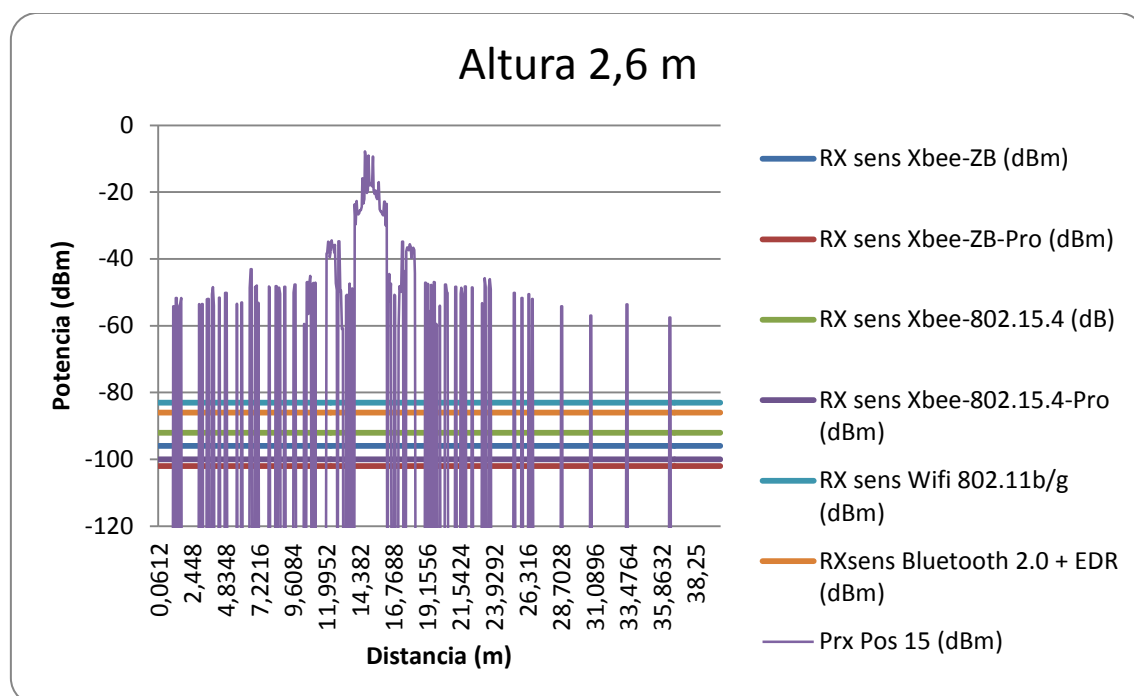
(XII)



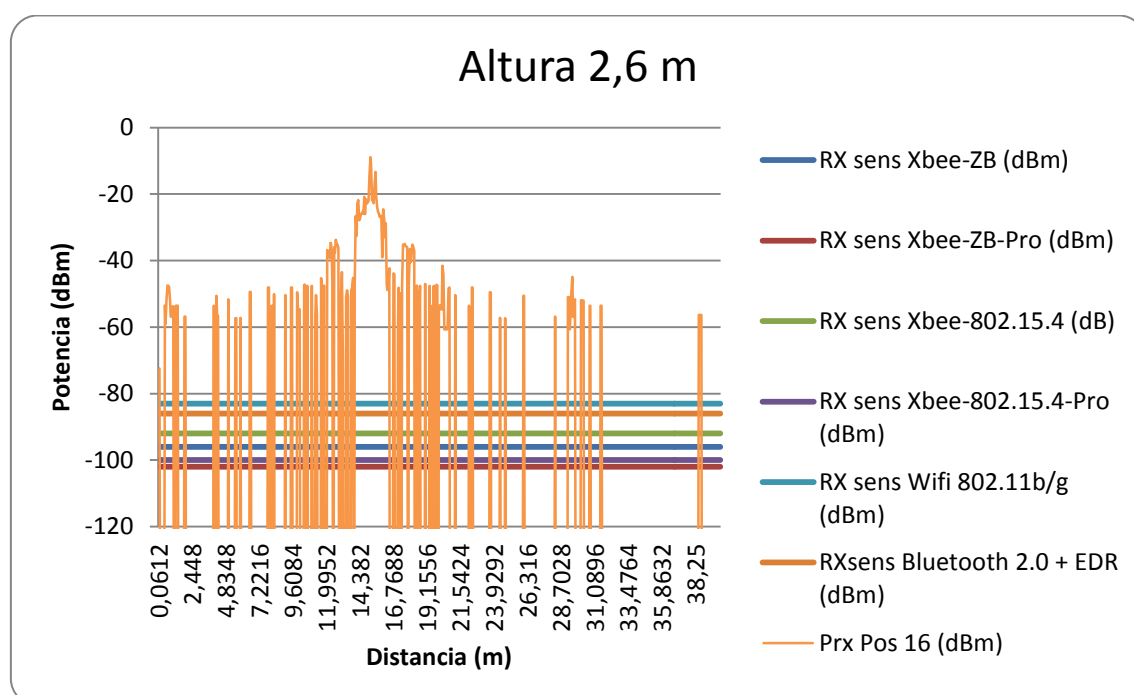
(XIII)



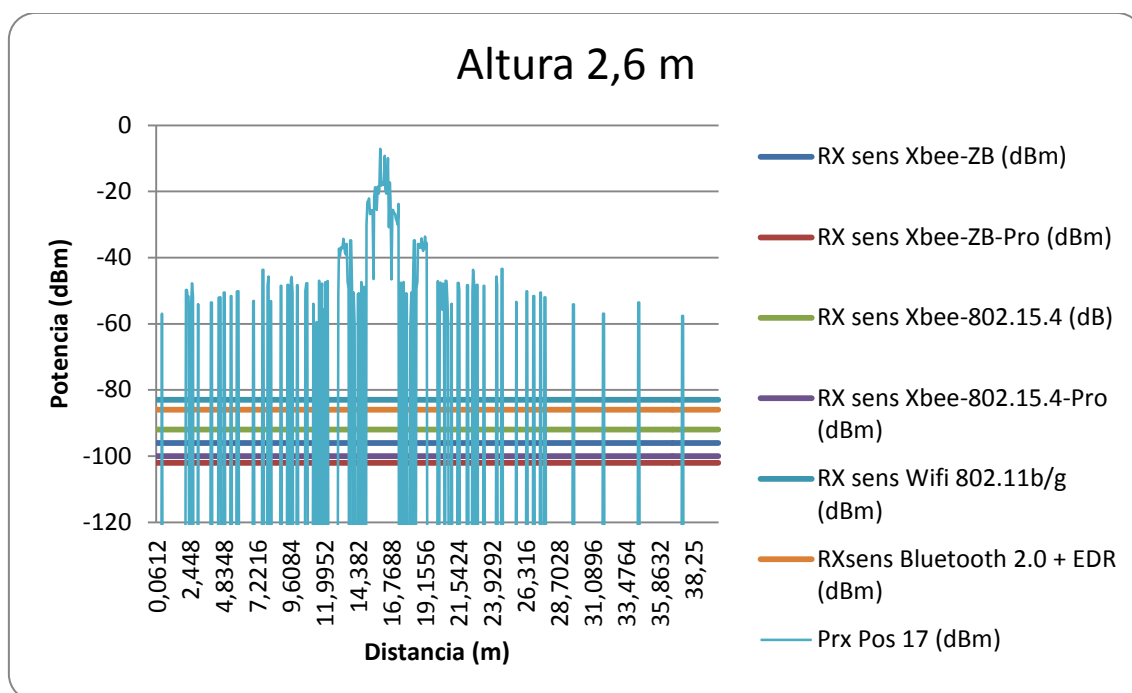
(XIV)



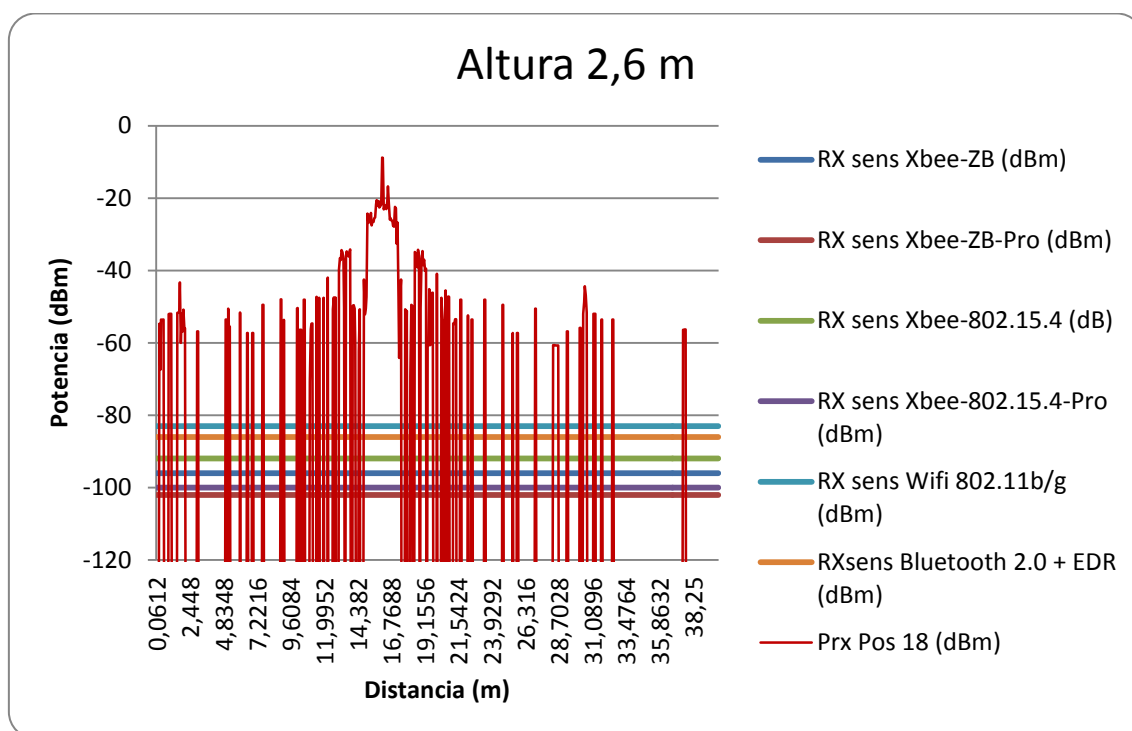
(XV)



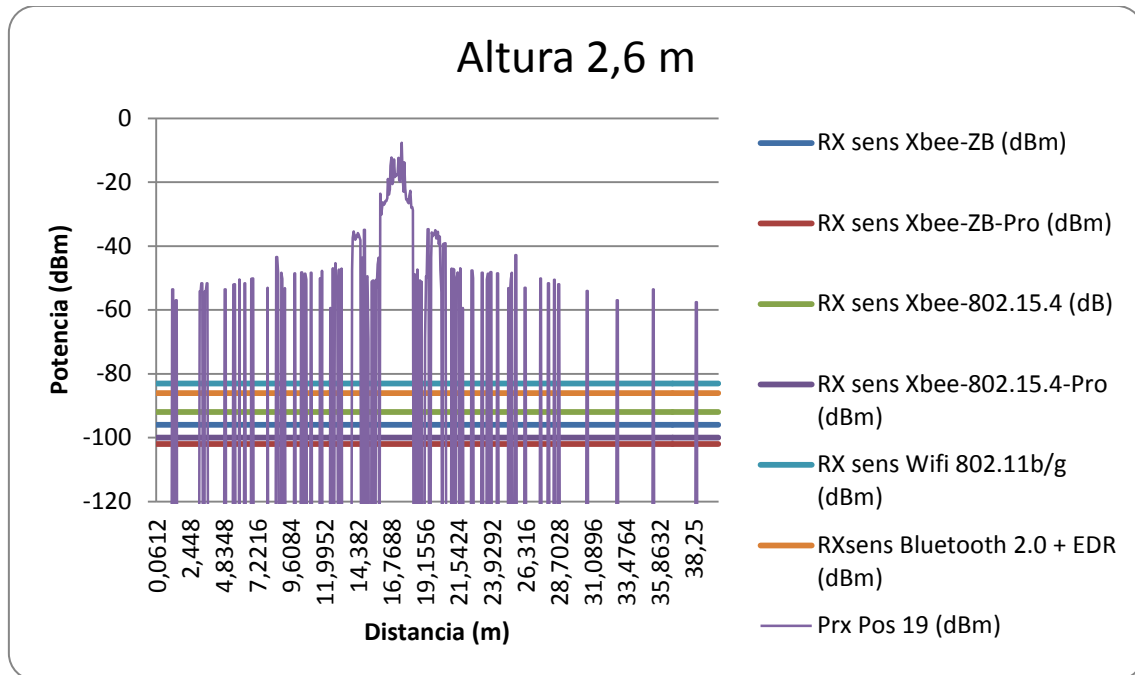
(XVI)



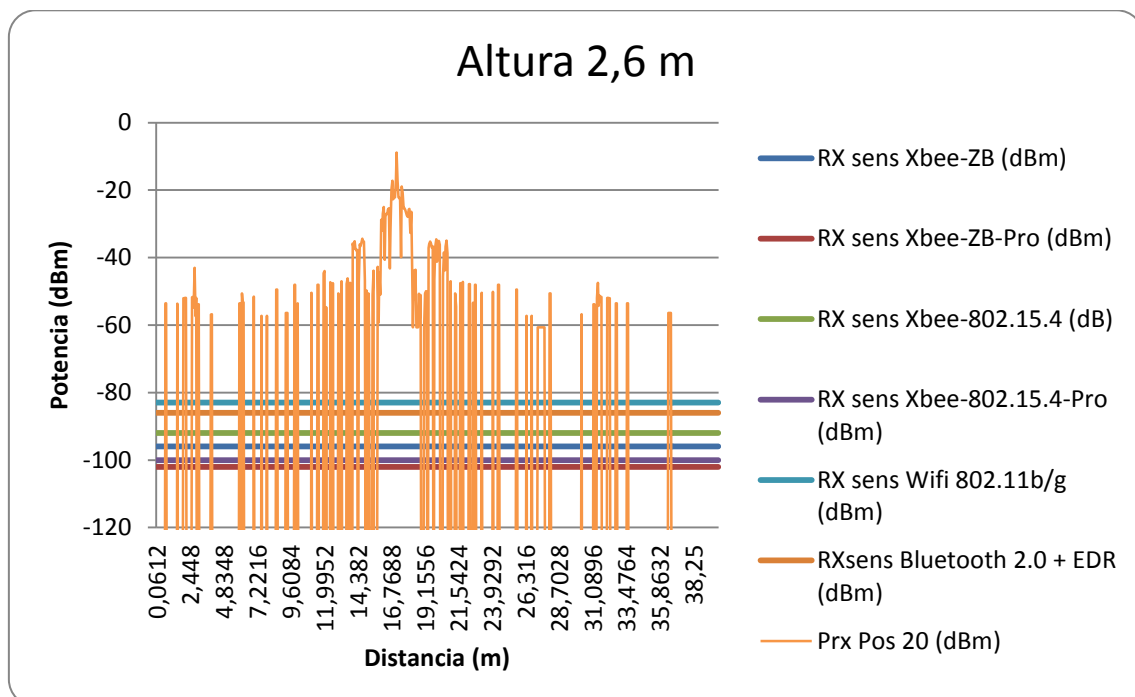
(XVII)



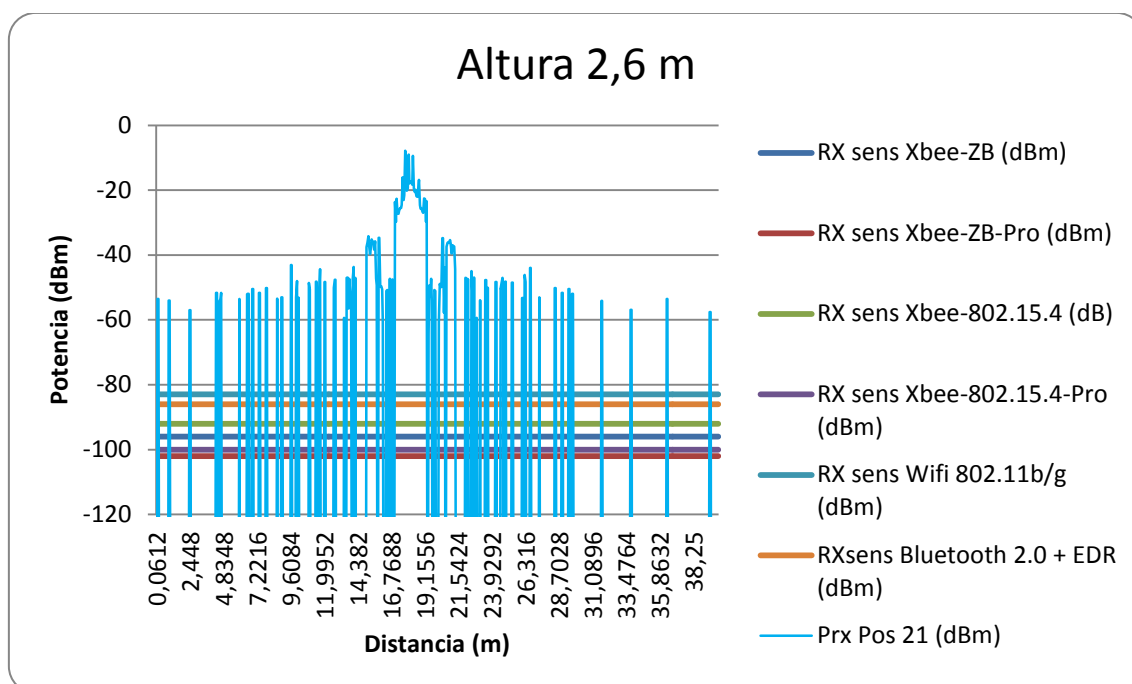
(XVIII)



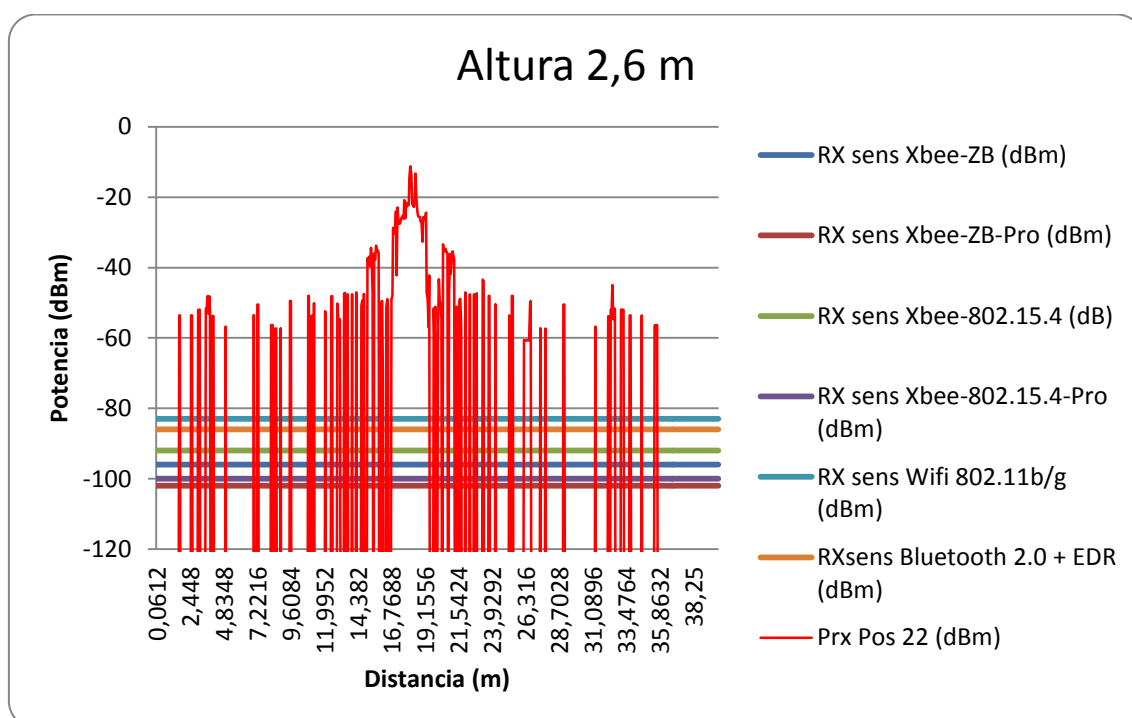
(XIX)



(XX)



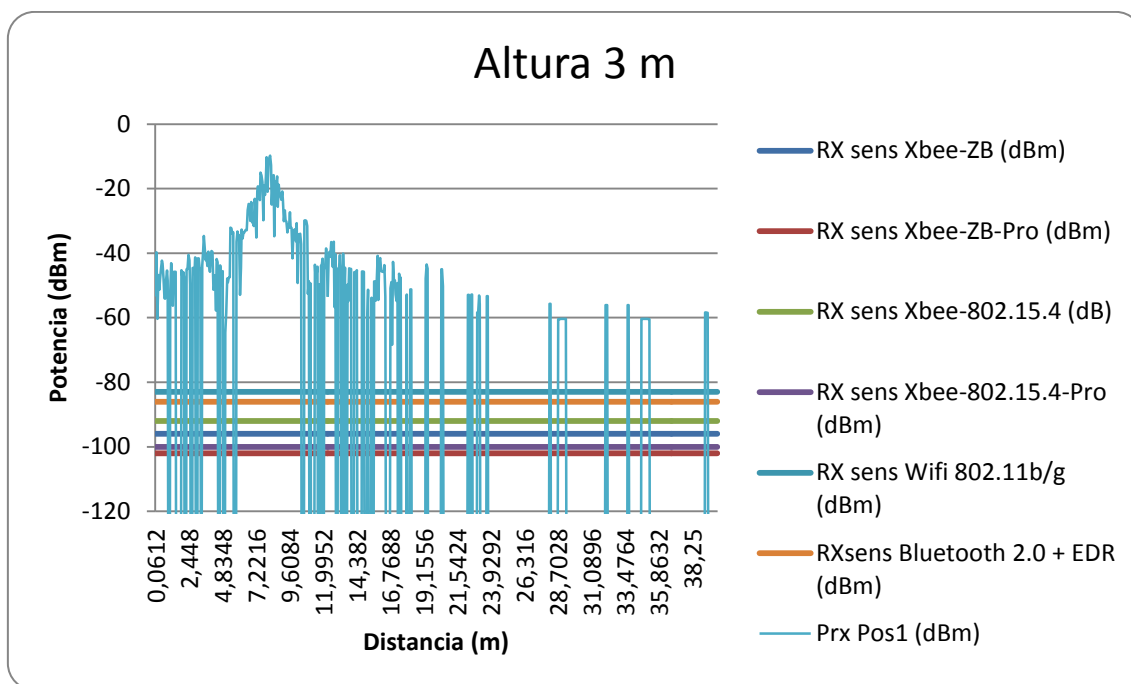
(XXI)



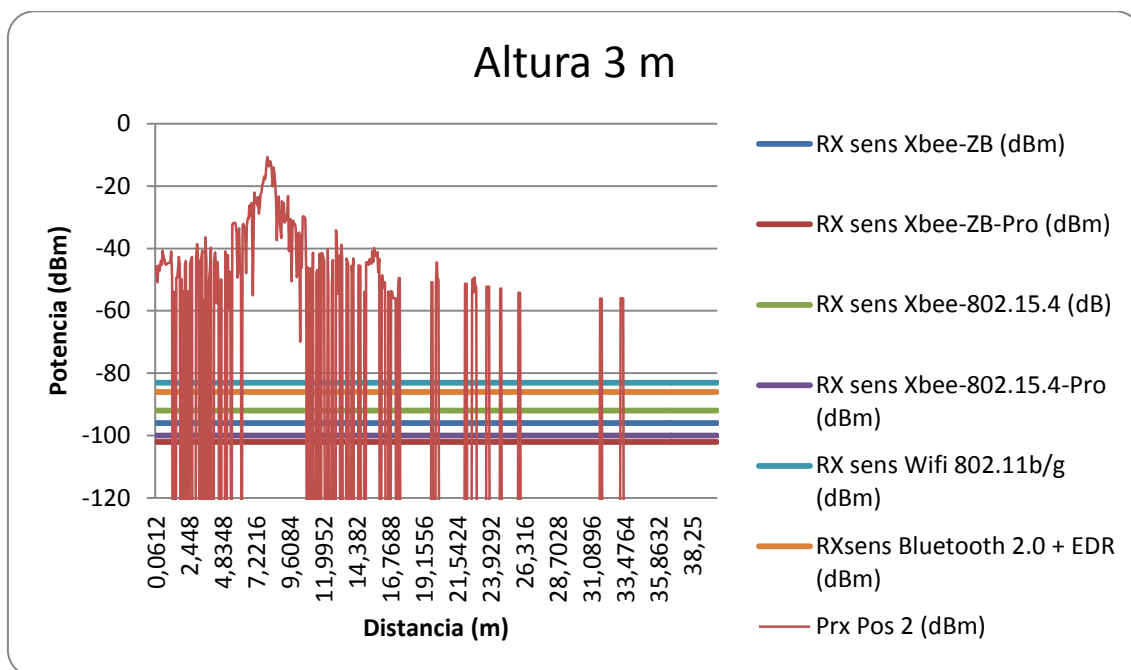
(XXII)

Fig. 104. Potencia recibida (dB) en función de la distancia (m) en la altura de 2.6 m para las diferentes ubicaciones de los transceptores para su comparación con la sensibilidad de motas de Libelium (protocolos ZigBee, Wifi y Bluetooth).

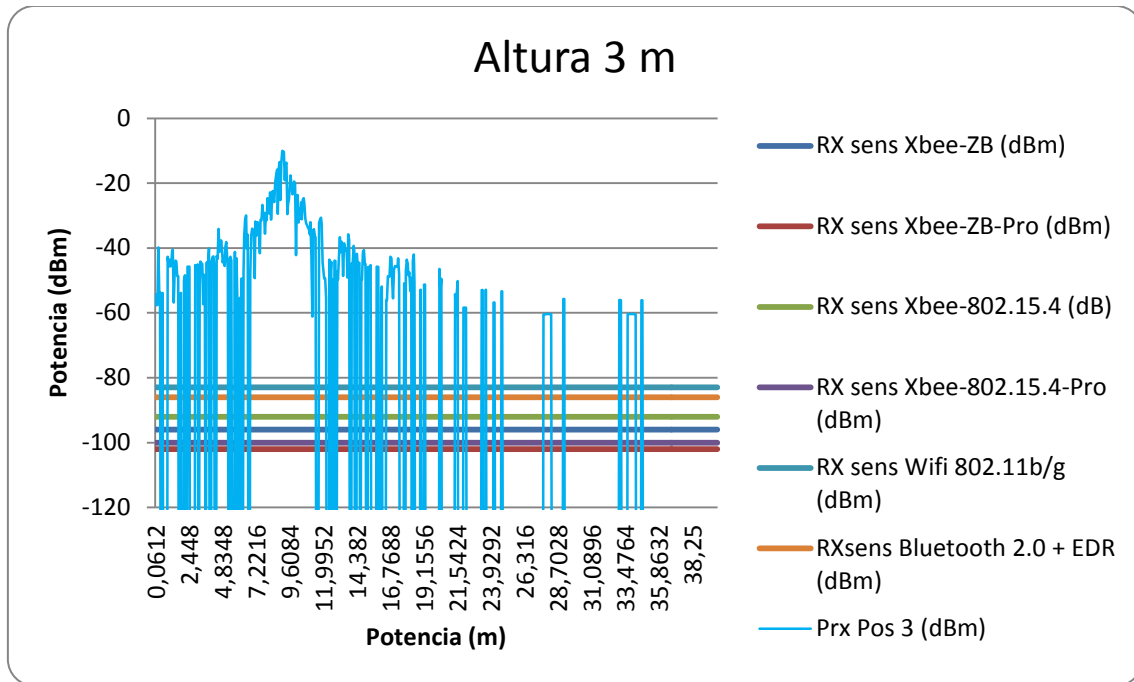
Radiales para la altura de 3 m



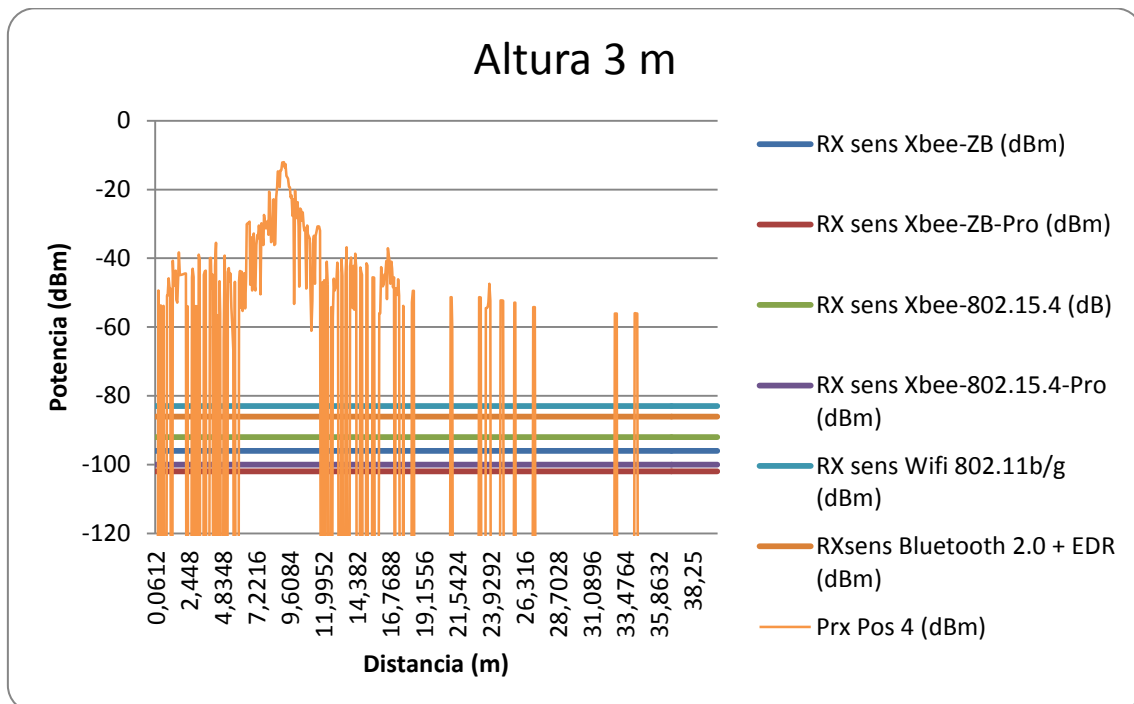
(I)



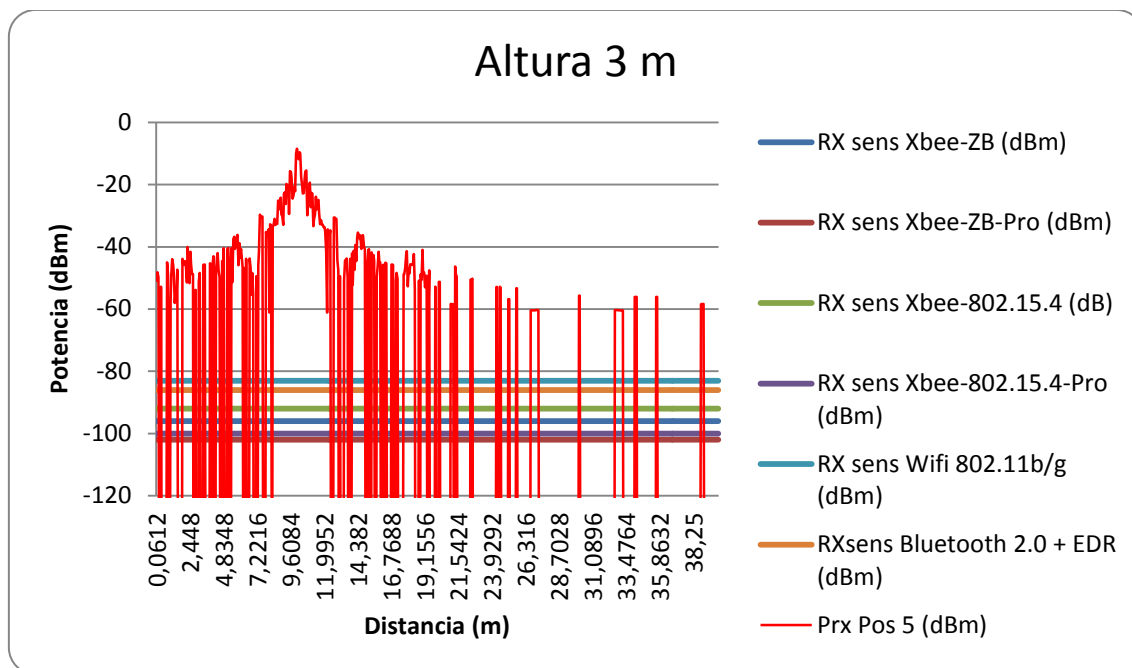
(II)



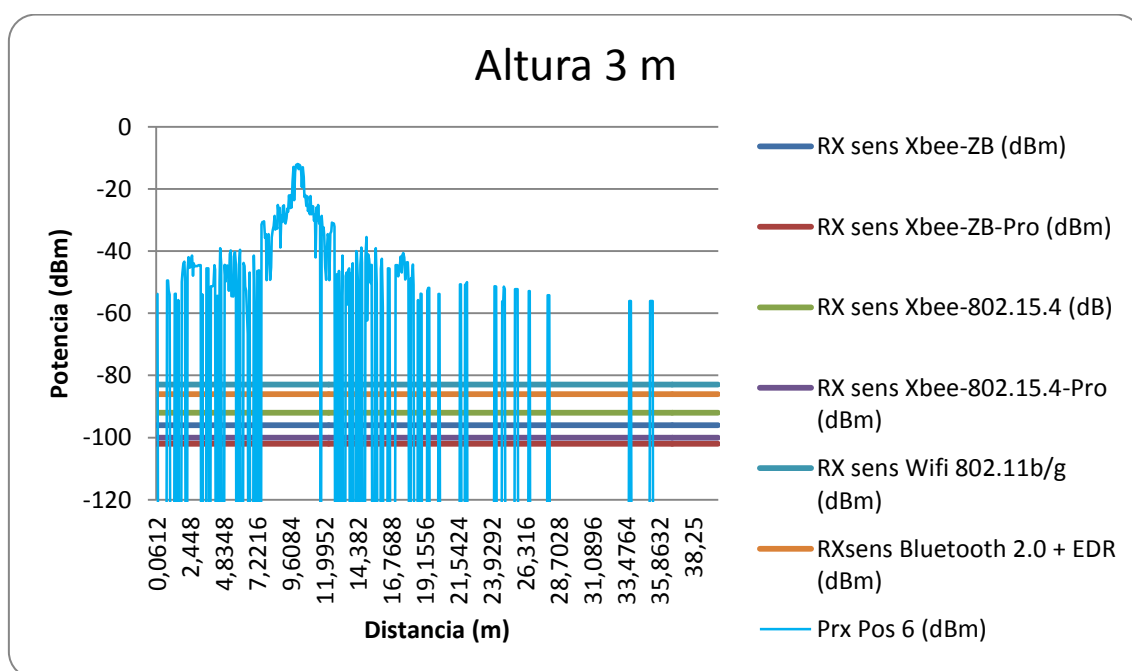
(III)



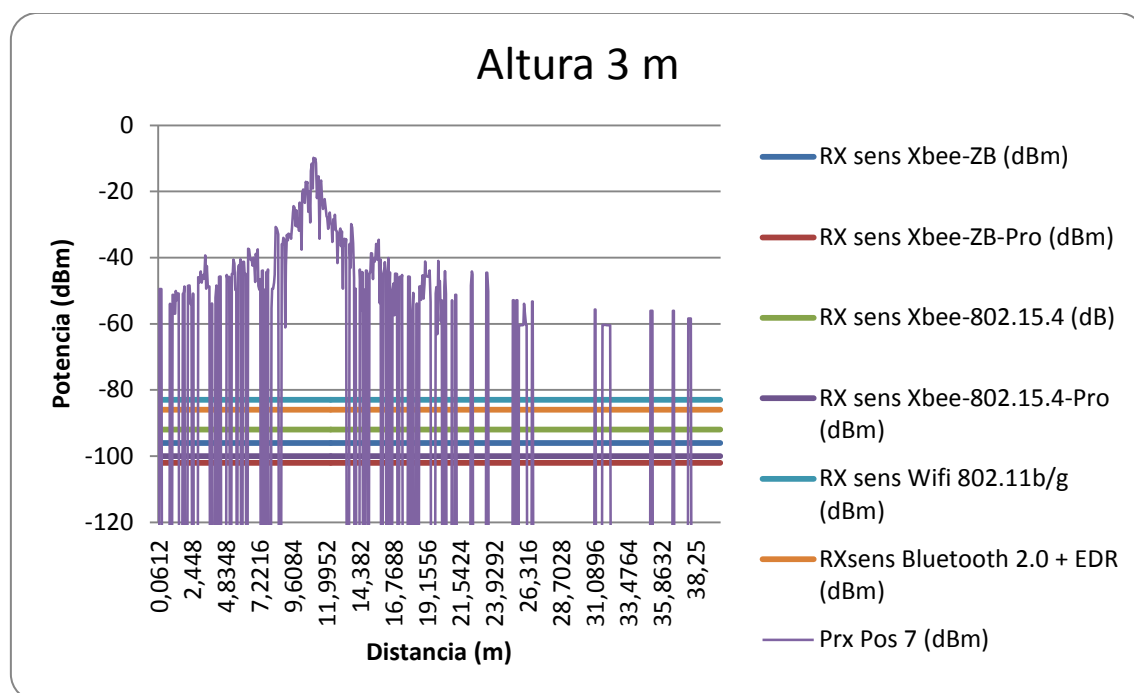
(IV)



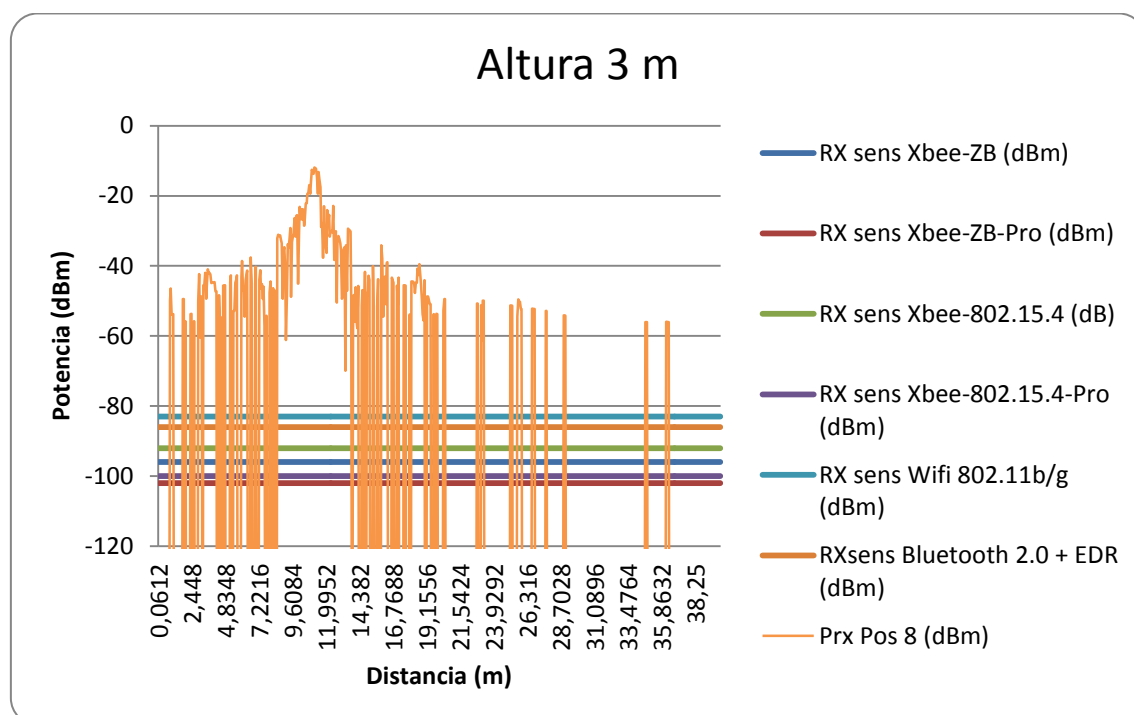
(V)



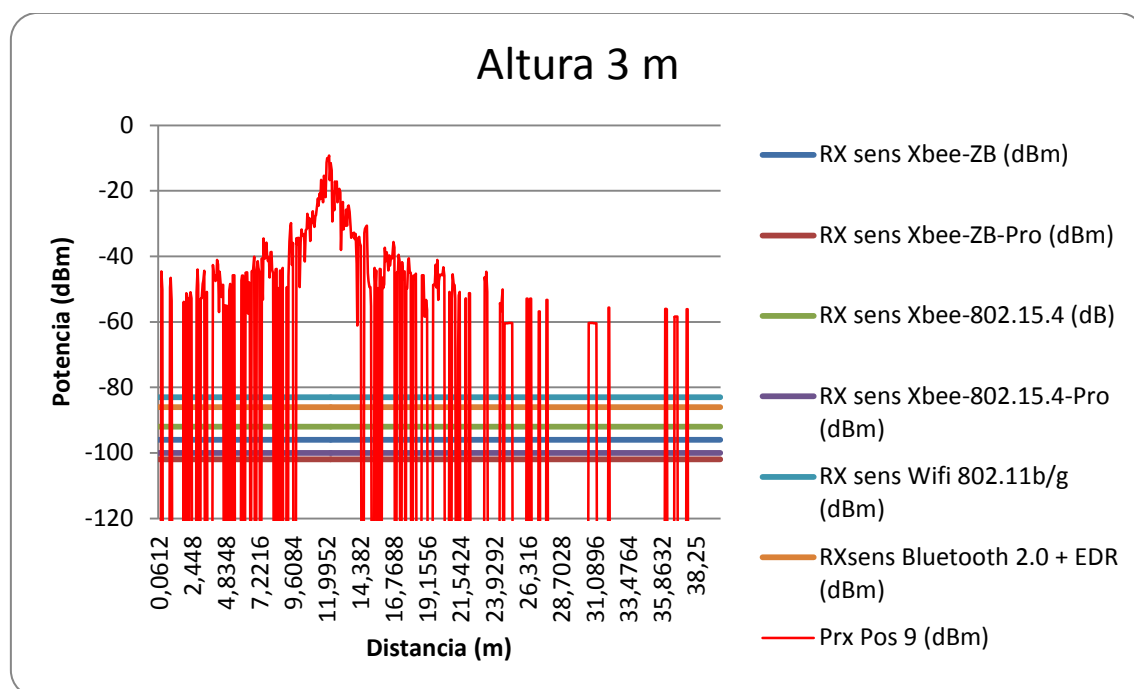
(VI)



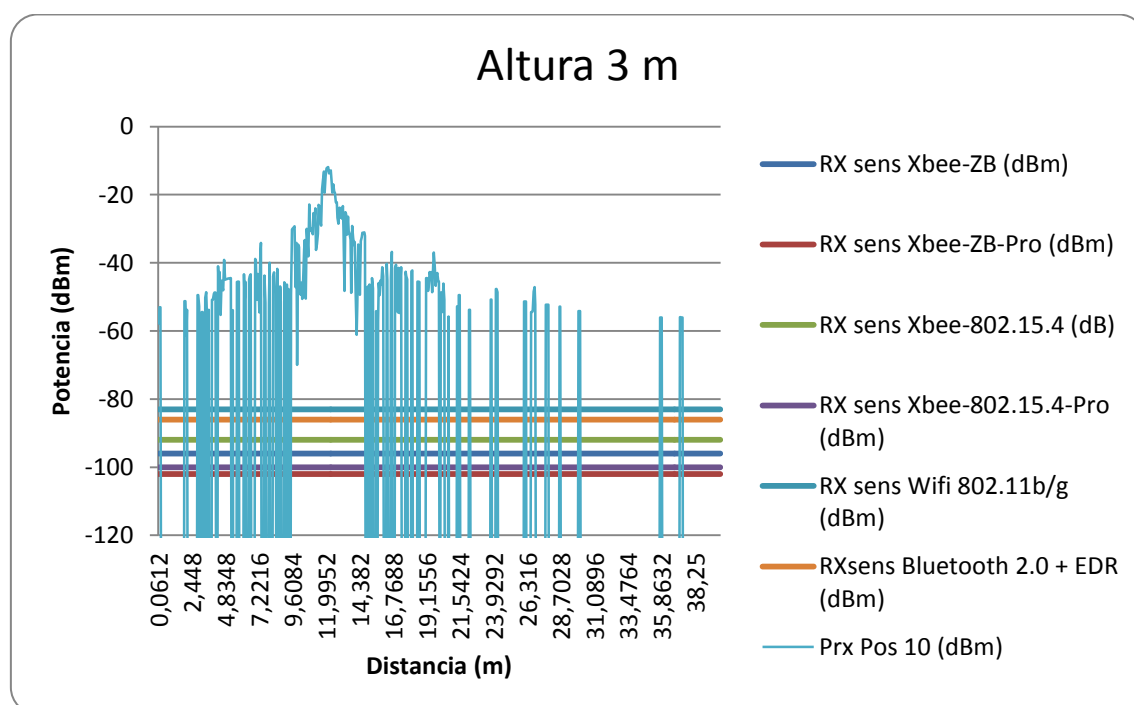
(VII)



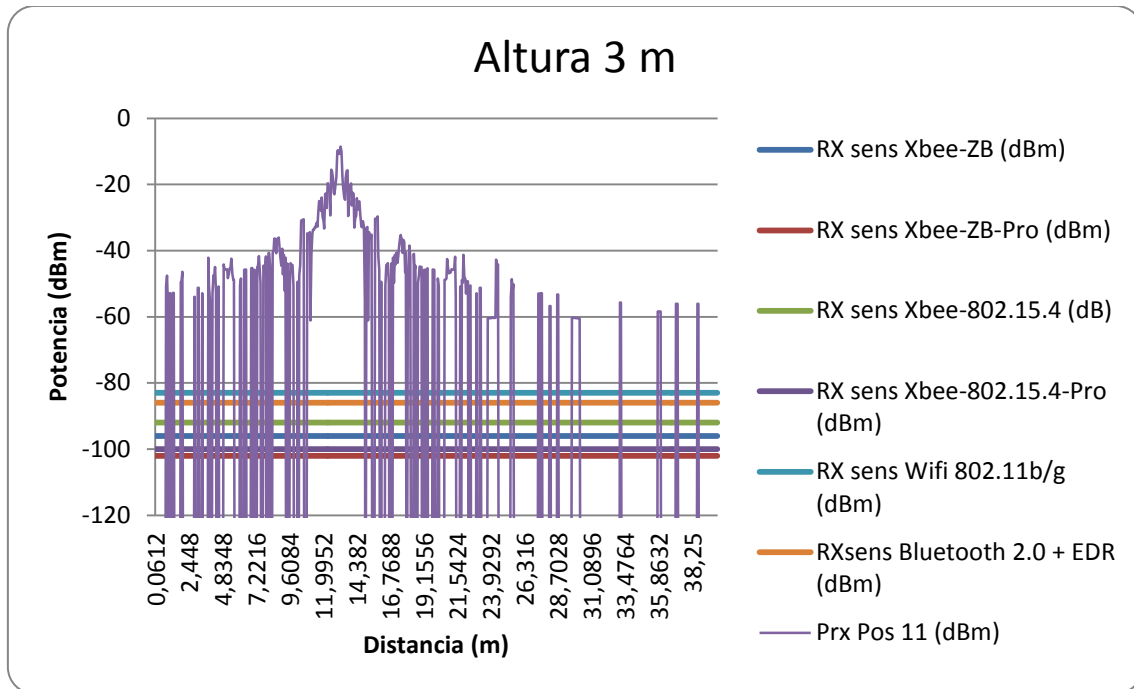
(VIII)



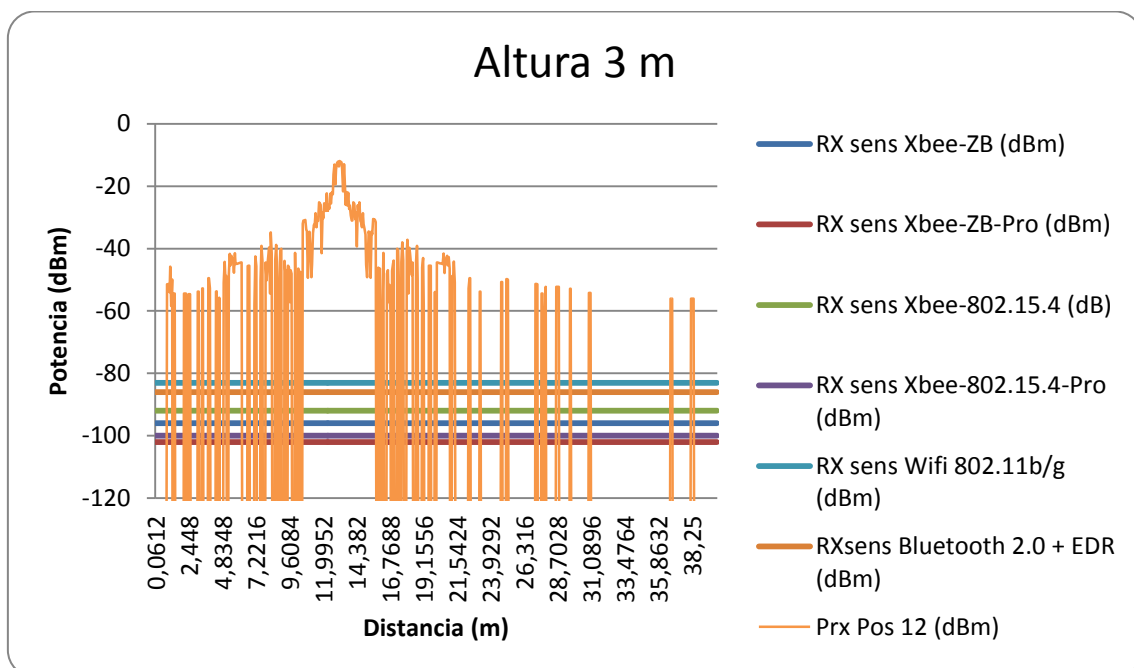
(IX)



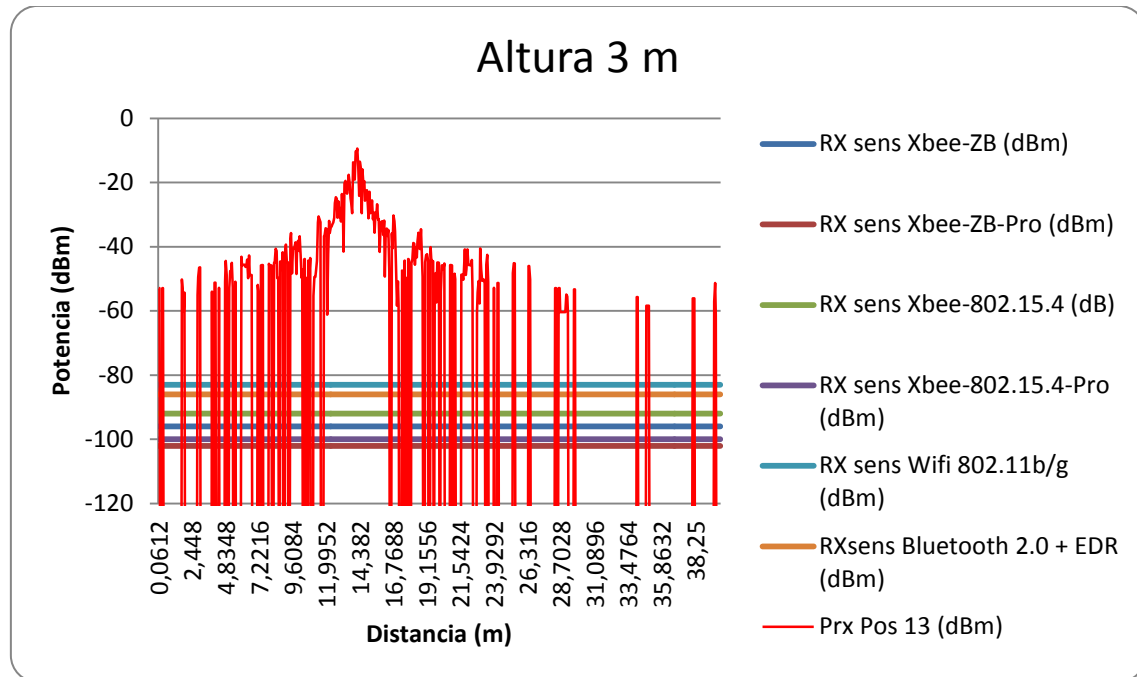
(X)



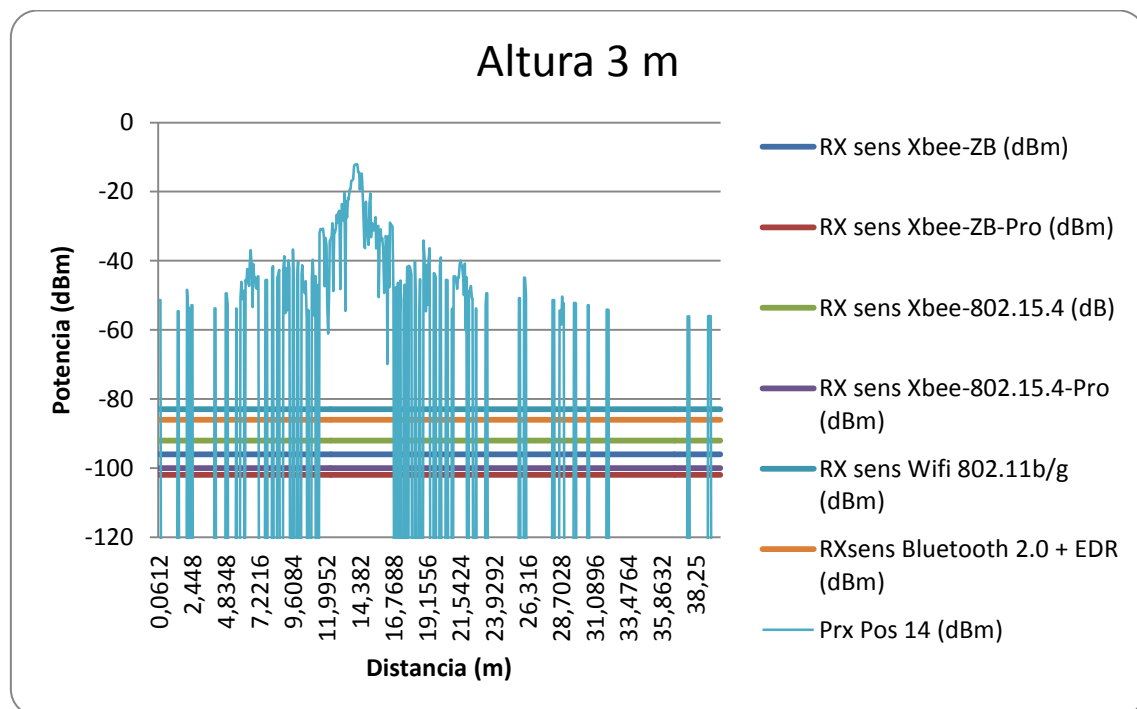
(XI)



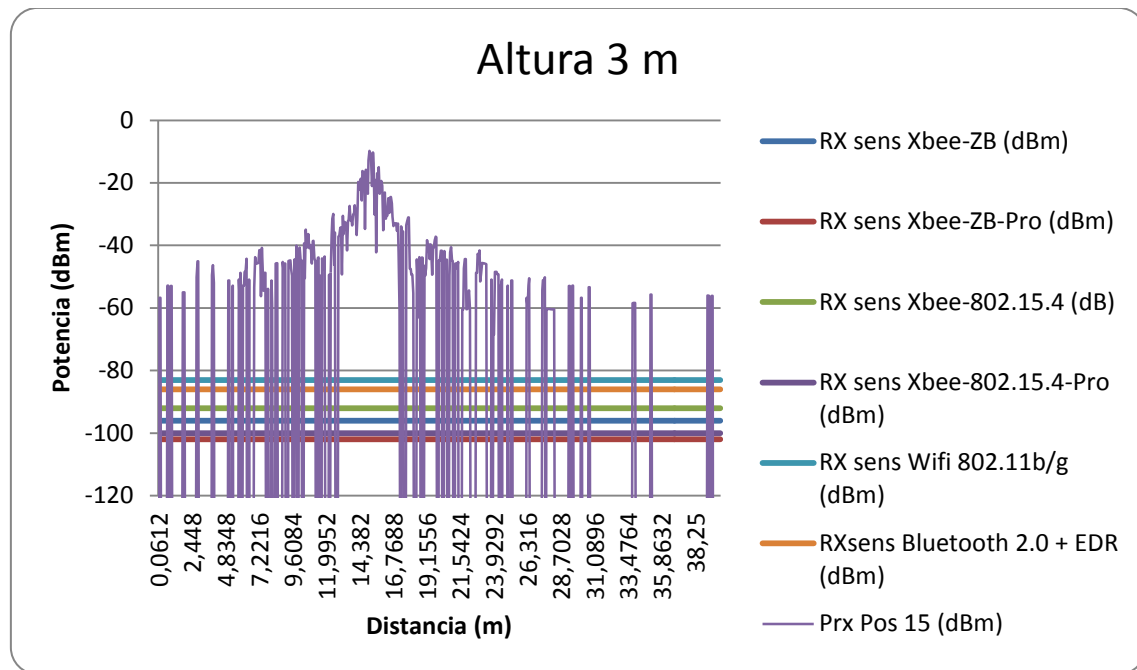
(XII)



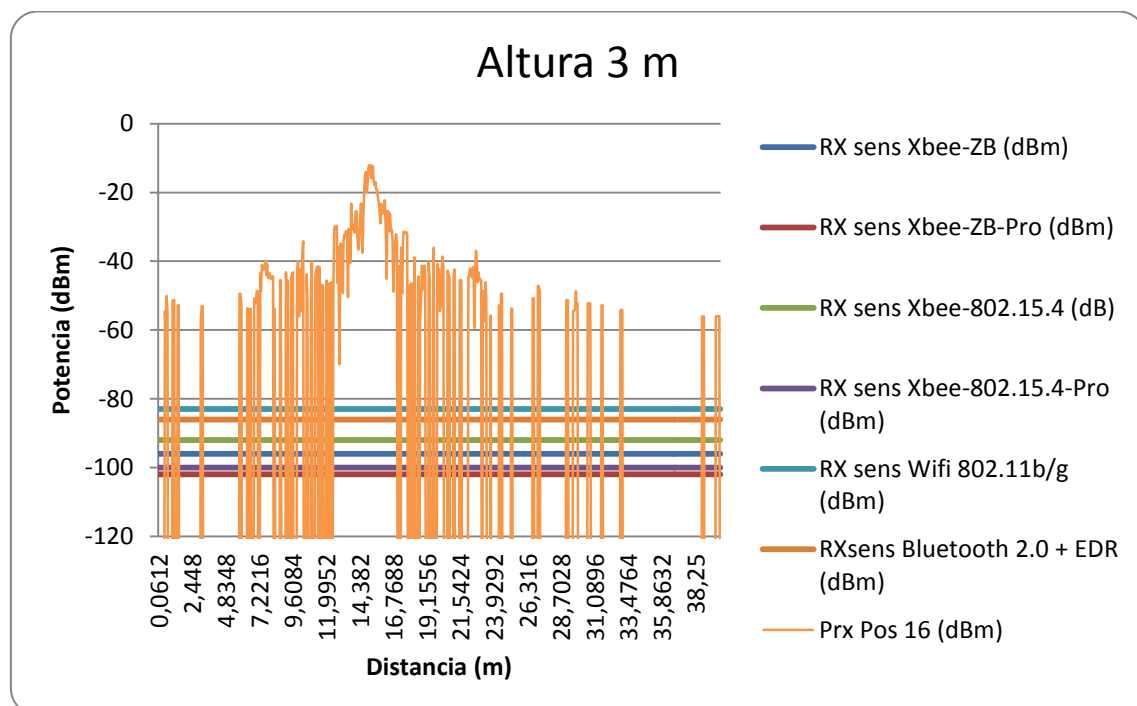
(XIII)



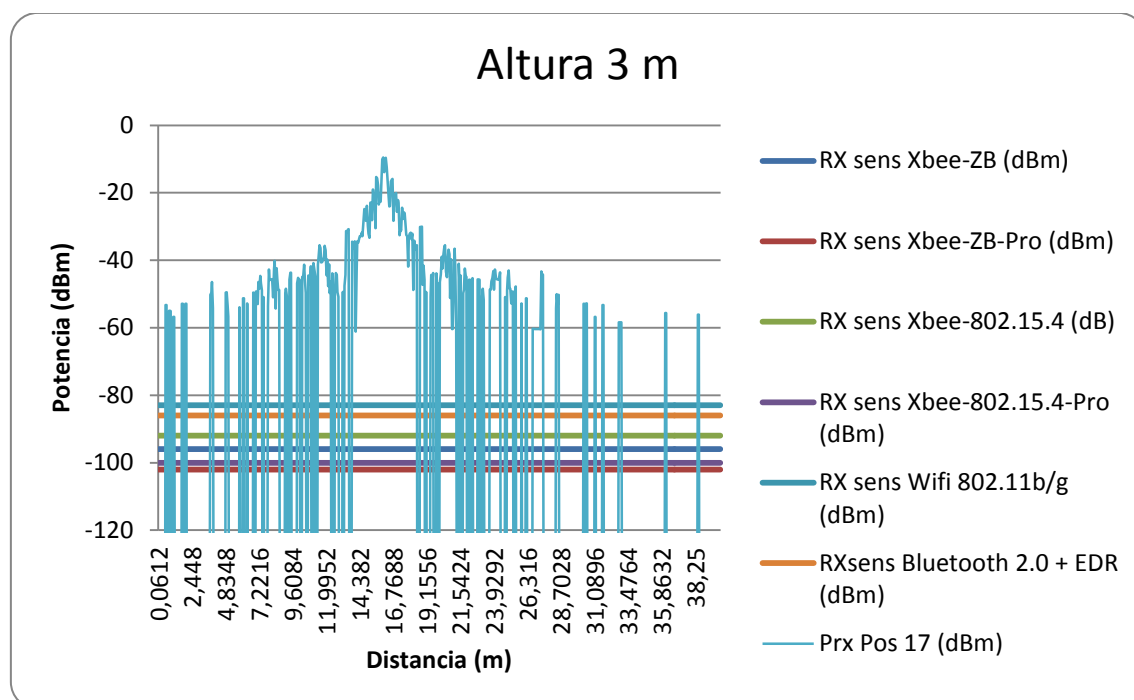
(XIV)



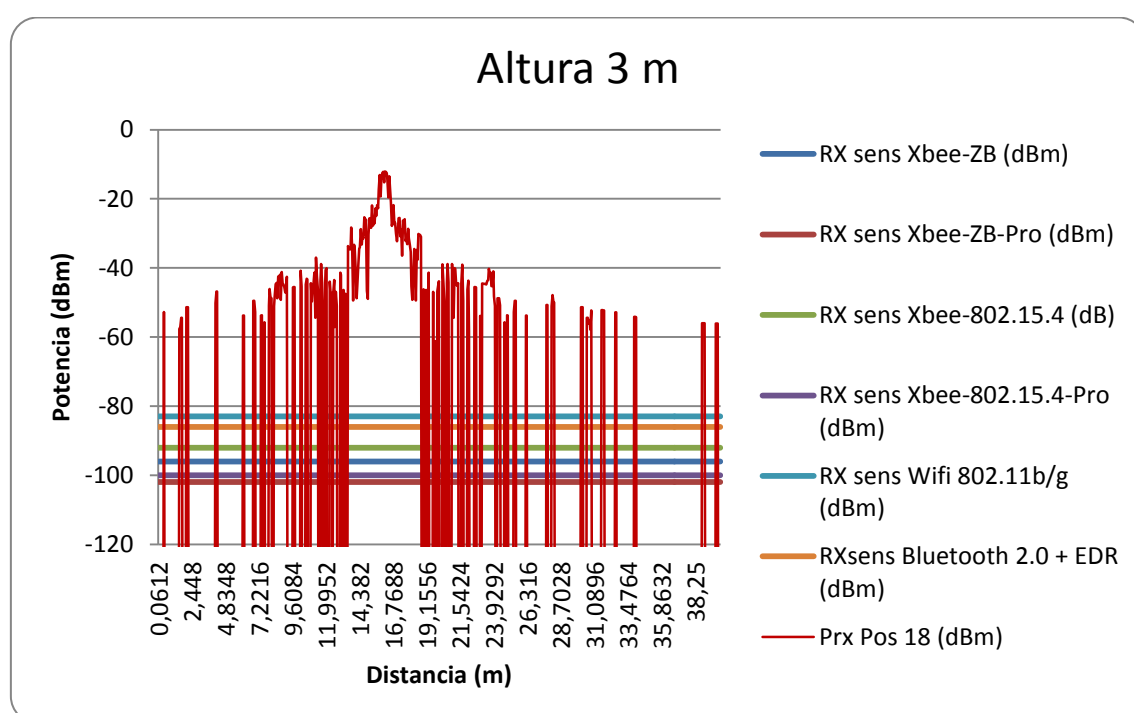
(XV)



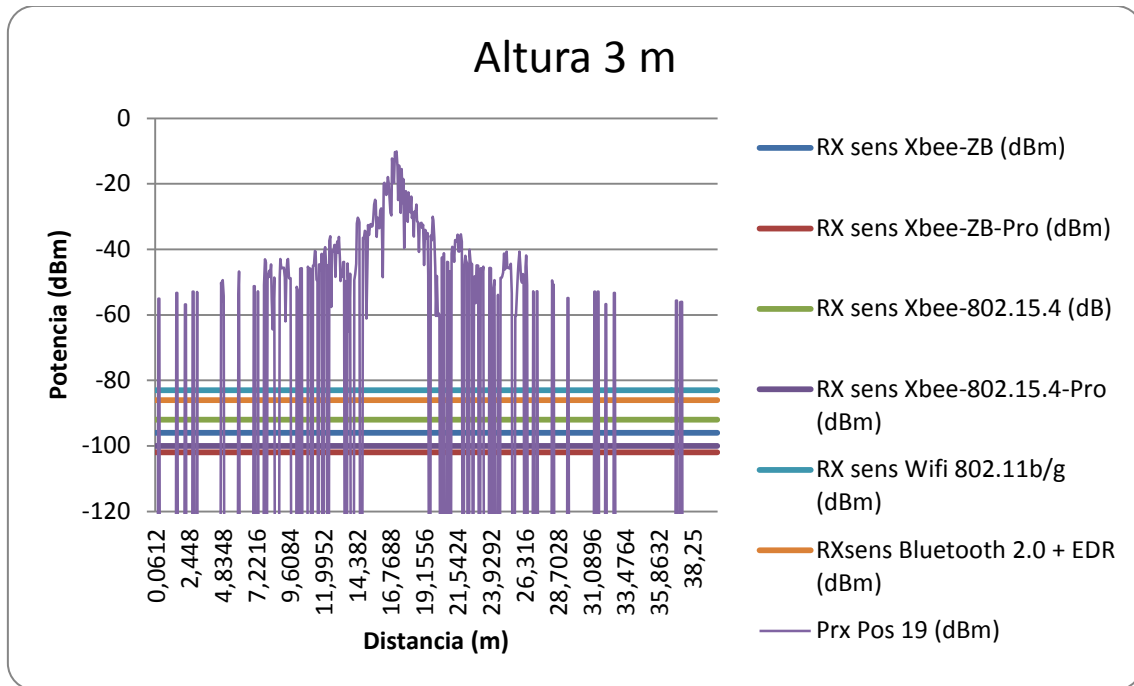
(XVI)



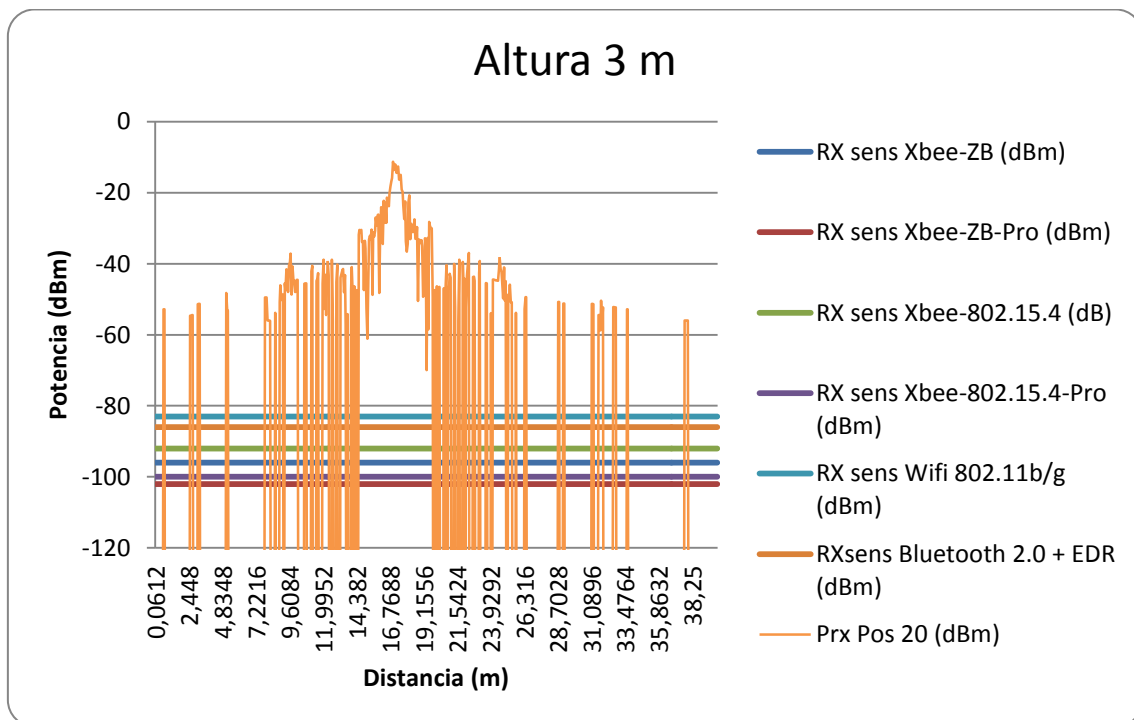
(XVII)



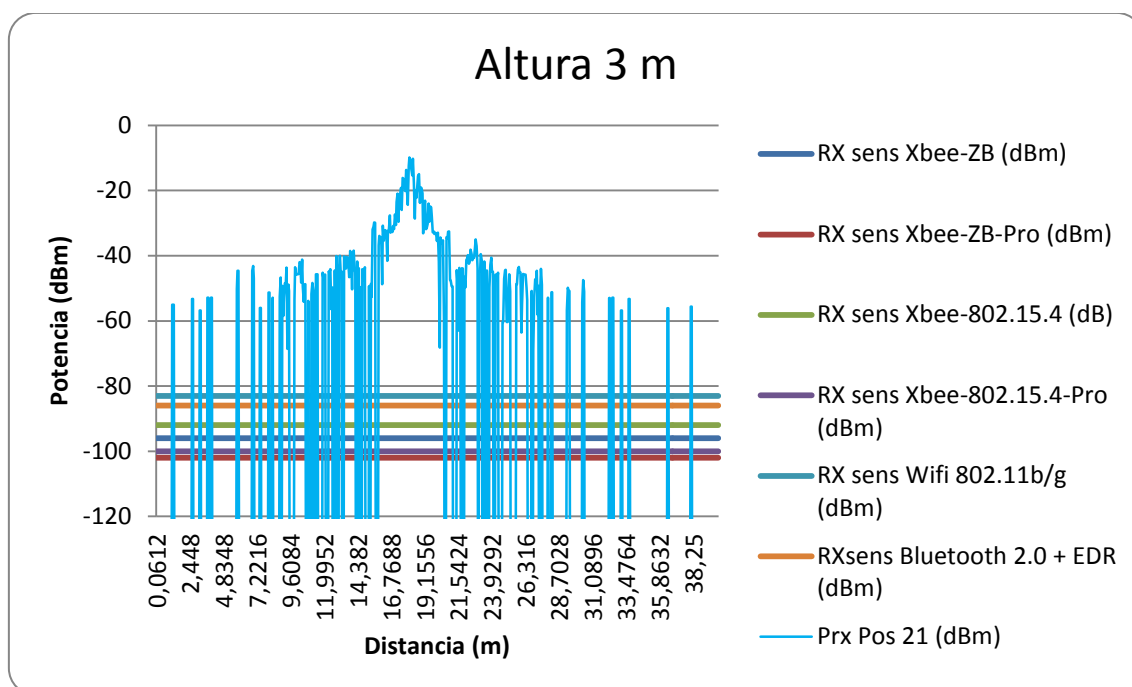
(XVIII)



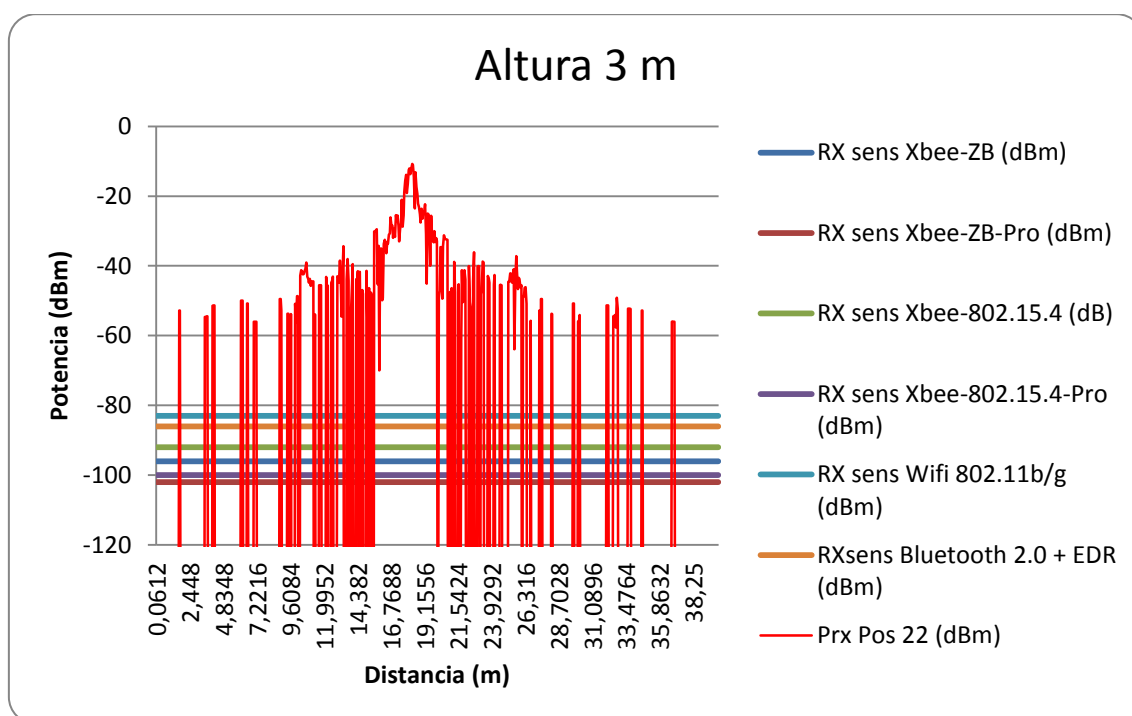
(XIX)



(XX)



(XXI)



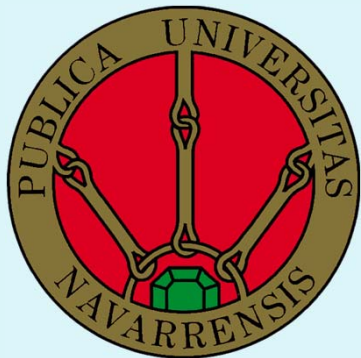
(XXII)

Fig. 105. Potencia recibida (dB) en función de la distancia (m) en la altura de 3 m para las diferentes ubicaciones de los transceptores para su comparación con la sensibilidad de motas de Libelium (protocolos ZigBee, Wifi y Bluetooth).

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Técnica de Telecomunicación

Aplicación de tecnologías inalámbricas de bajo consumo para entornos exteriores ferroviarios



Autor: Víctor Garrido Calvo
Tutor: Francisco Javier Falcone Lanas



Contenido

- 1. Introducción**
- 2. Objetivos**
- 3. Estado del arte**
- 4. Análisis de resultados**
- 5. Conclusiones y líneas futuras**

Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Introducción

Estado actual del sector ferroviario



Escaso avance tecnológico
Sector tecnológicamente estancado
Sector económicamente deficitario

Se aboga por la revitalización y fortalecimiento del ferrocarril



¿Cómo?



Apoyándose en ventajas como



Menor coste del transporte
Menor consumo energético
Menor impacto ambiental
Mayor volumen de mercancías transportadas
Reducción saturación carreteras

Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Objetivos

Análisis del funcionamiento de tecnologías inalámbricas de bajo consumo para



La interconexión entre vagones de tren



Que permitan



- ✓ Optimizar la ubicación de los transceptores
- ✓ Reduciendo así el coste de los equipos
- ✓ Y disminuyendo el consumo energético

Introducción

Objetivos

Estado del arte

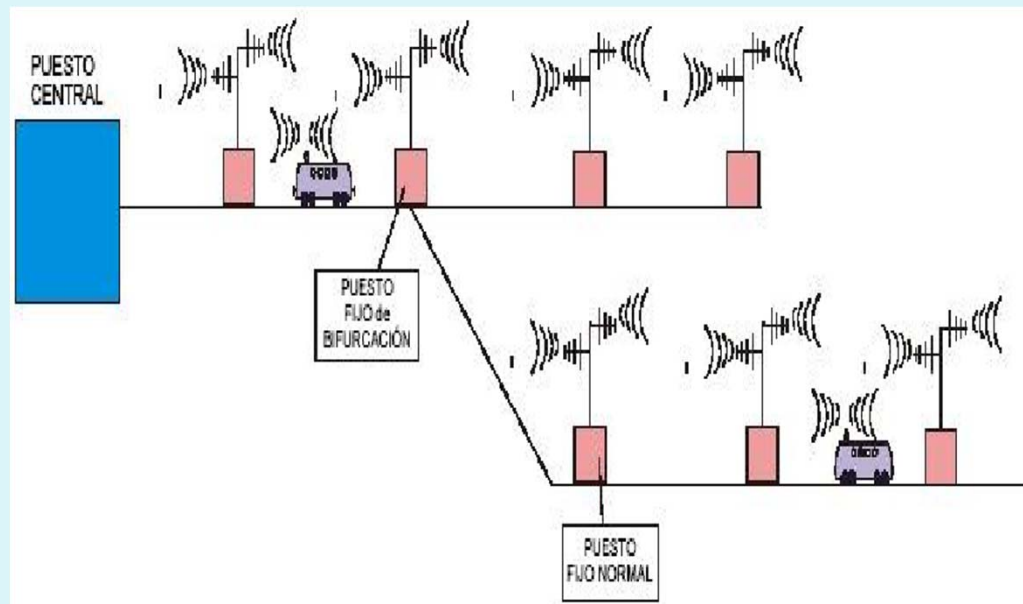
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Estado del arte

➤ Sistema analógico tradicional tren-tierra



- Es un sistema clásico
- Establece un canal telefónico para transmisión datos
- Sólo un equipo puede hablar simultáneamente con el puesto central



Insuficiente

Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Estado del arte

➤ Sistemas digitales: GSM-R



- Sistema más avanzado que el anterior
- Basado en GSM/UMTS
- Usa balizas a lo largo de la vía para comunicarse con los trenes



Inconveniente: coste

Introducción

Objetivos

Estado del arte

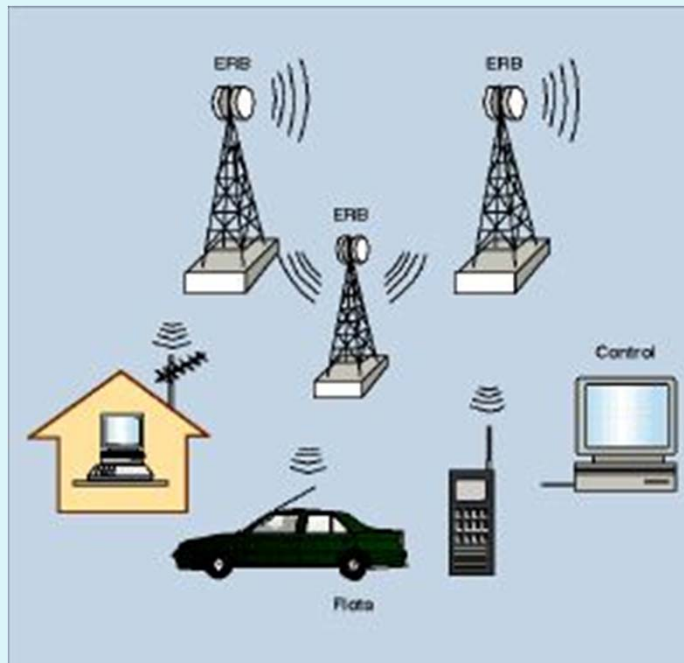
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Estado del arte

➤ Sistema de *trunking* digital TETRA



- Permite la transmisión de voz y datos
- En realidad no es un sistema creado específicamente para el sector ferroviario

Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Estado del arte

➤ ZigBee

- ✓ Redes inalámbricas de corto alcance
- ✓ Baja tasa de datos → La máxima tasa es de 250 Kbps
- ✓ Aplicaciones de bajo coste
- ✓ Baterías de larga duración → *Sleep mode*
- ✓ Frecuencias de operación: 868 MHz, 915 MHz y 2,4 GHz



Introducción

Objetivos

Estado del arte

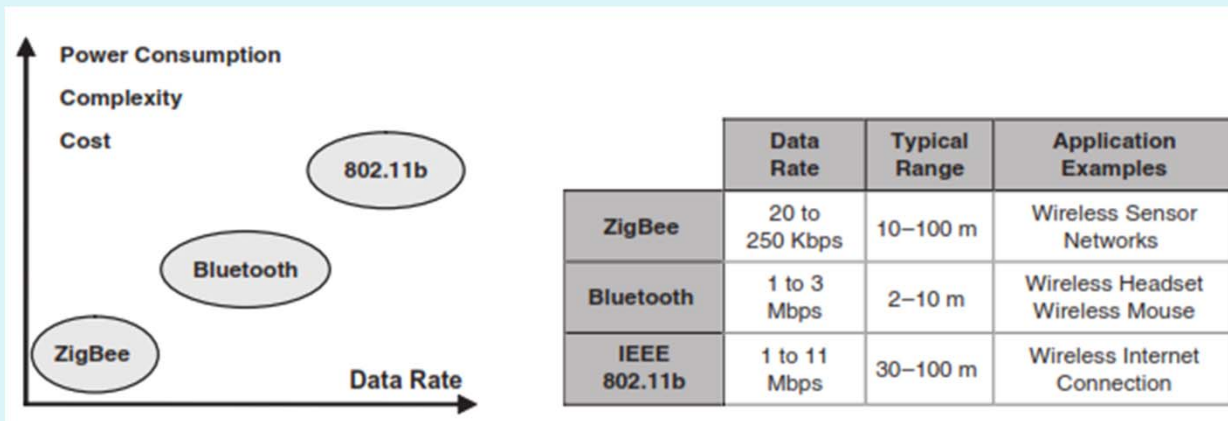
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Estado del arte

➤ ZigBee



Introducción

Objetivos

Estado del arte

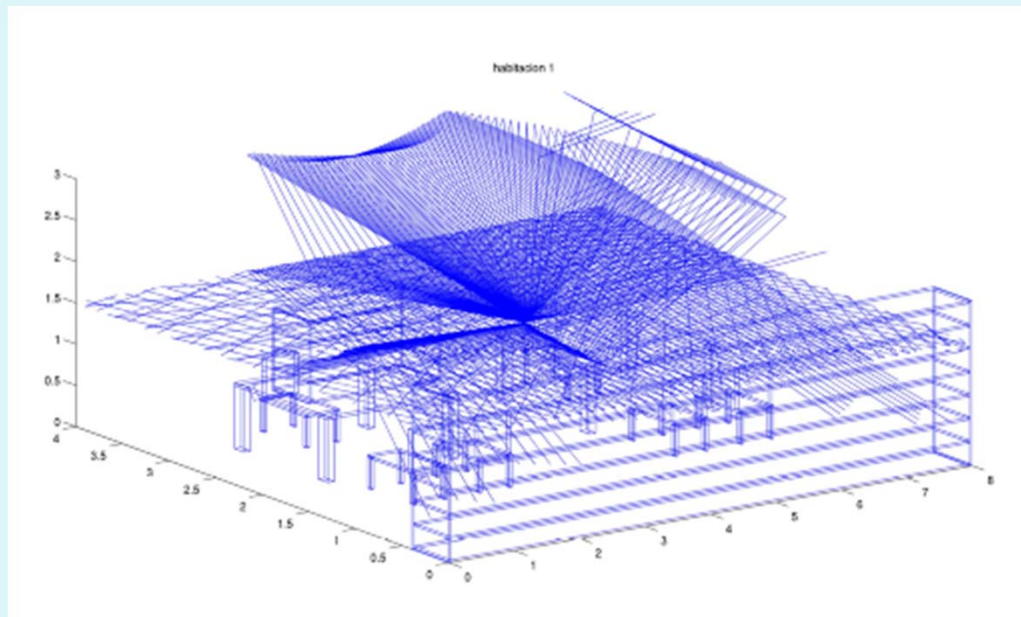
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Estado del arte

➤ Algoritmo trazado de rayos 3D



- ✓ Recreación de un modelo realista
- ✓ Modelado 3D todo tipo objetos
- ✓ Fenómenos reflexión, refracción, difracción y *scattering*
- ✓ Constante dieléctrica y tangente de pérdidas de los materiales

Introducción

Objetivos

Estado del arte

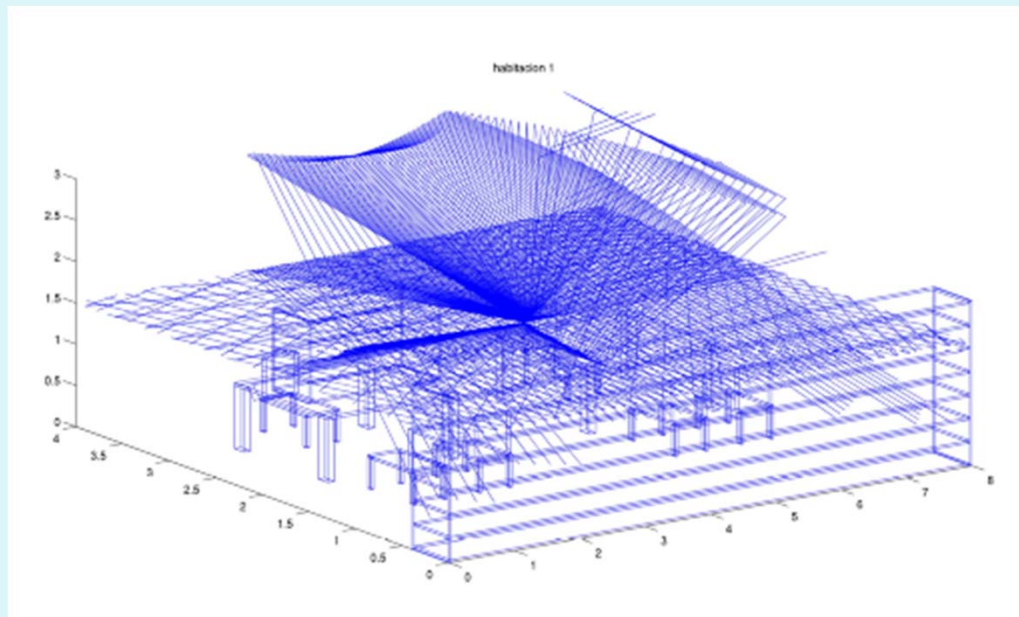
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Estado del arte

➤ Algoritmo trazado de rayos 3D: parámetros a introducir



- ✓ Posición de las antenas
- ✓ de las antenas
- ✓ Directividad de las antenas
- ✓ N° de rebotes
- ✓ Frecuencia de trabajo
- ✓ Materiales de las paredes
- ✓ Dimensiones y resolución de la habitación

Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

1. Descripción del escenario de simulación para trazado de rayos 3D
2. Análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario
3. Respuesta del enlace radioeléctrico frente a la sensibilidad
4. Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transceptores

Introducción

Objetivos

Estado del arte

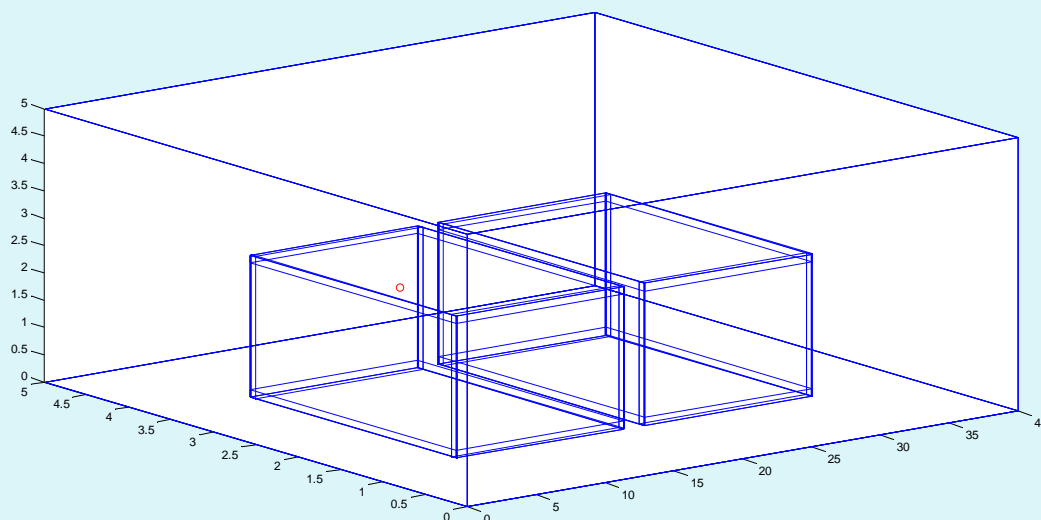
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

Descripción del escenario de simulación para trazado de rayos 3D



- Dos cubos metálicos dentro de una habitación cuyo material es aire
- Dimensiones 12,16/2,44/2,60 cm (Largo/Ancho/Alto)
- Resolución cuboides 6 cm
- Parámetros simulación:
 - ✓ 2,4 GHz
 - ✓ : 2 mW
 - ✓ : 1,7 dB
 - ✓ : 0 dB
 - ✓

Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

Análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario

Se define una configuración sobre el techo del vagón con un total de 22 posiciones en las que se propone la ubicación de los transceptores separados 1 metro



El estudio se basa en la obtención para diferentes alturas de:

- ✓ Planos bidimensionales de potencia recibida
- ✓ Gráficas de potencia-distancia (radiales)
- ✓ Perfiles de retardo-potencia

Introducción

Objetivos

Estado del arte

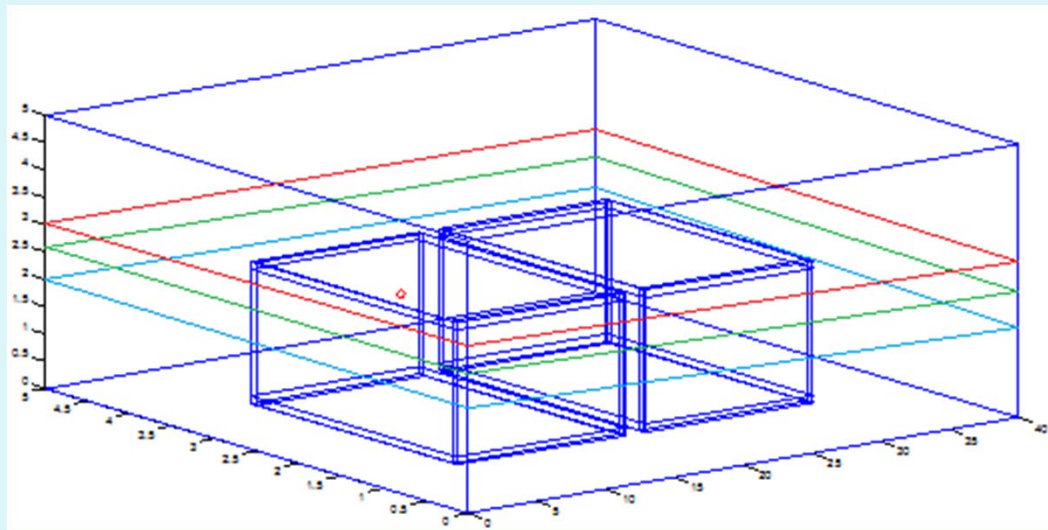
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

Análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario



- Altura de 3 m
- Altura de 2,6 m
- Altura de 2 m

Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

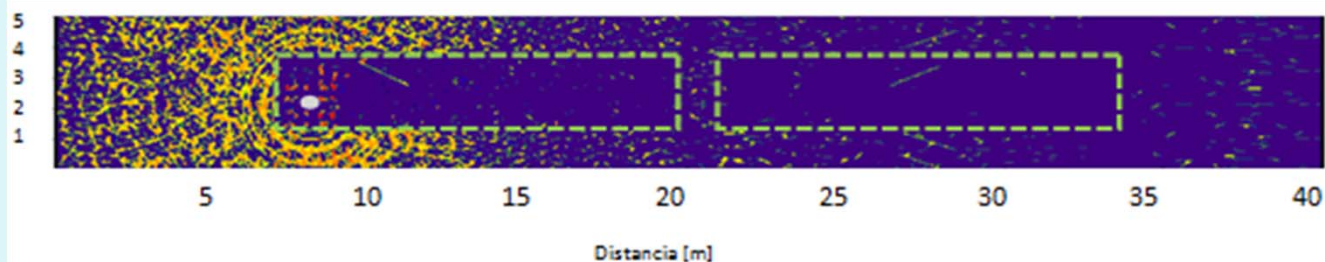
Conclusiones y líneas futuras



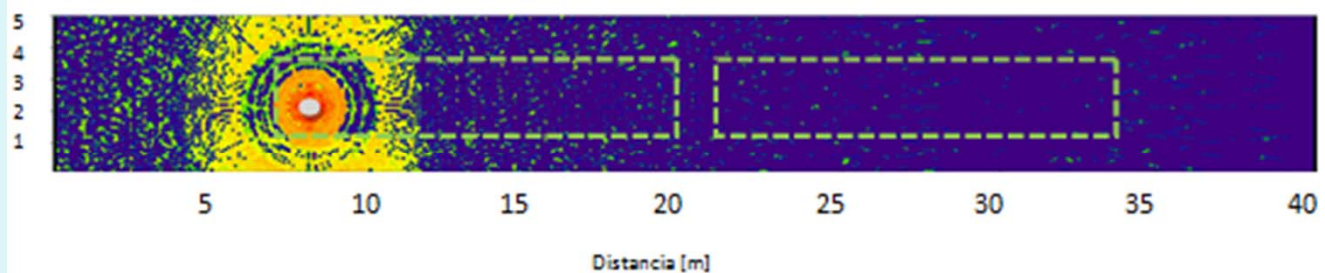
Análisis de los resultados

Análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario

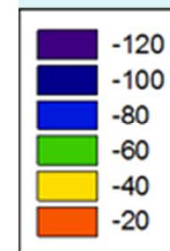
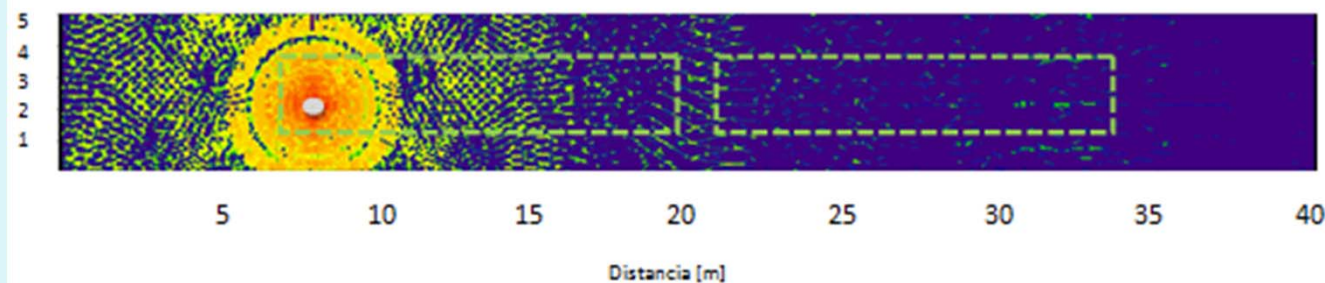
Altura de 2 m



Altura de 2,6 m



Altura de 3 m



[dBm]

Introducción

Objetivos

Estado del arte

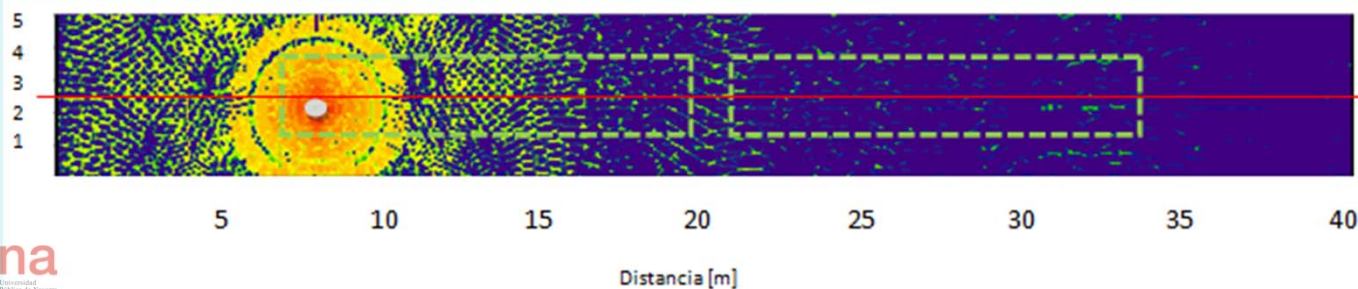
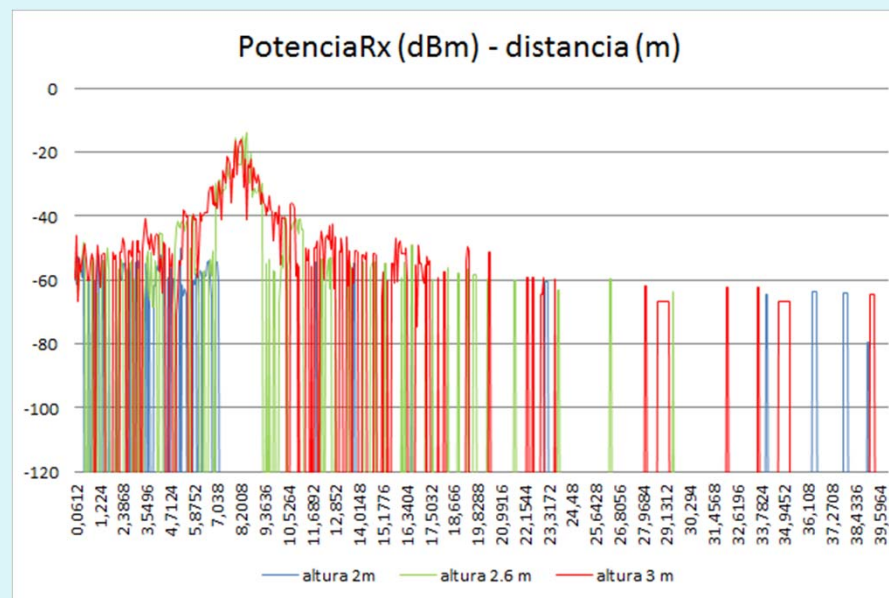
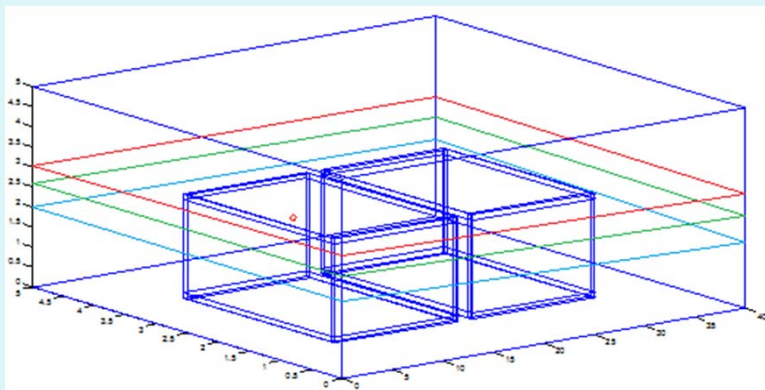
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

Análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario



Introducción

Objetivos

Estado del arte

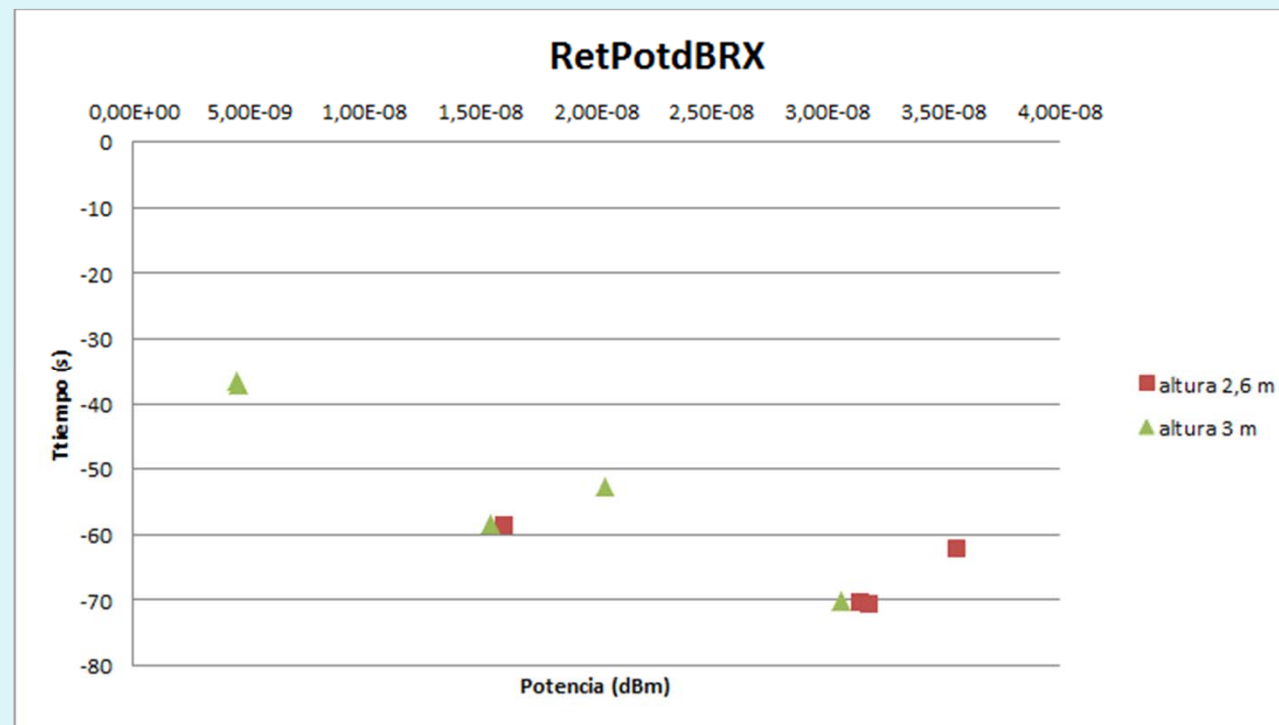
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

Análisis del comportamiento radioeléctrico del escenario



Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

Respuesta del enlace radioeléctrico frente a la sensibilidad

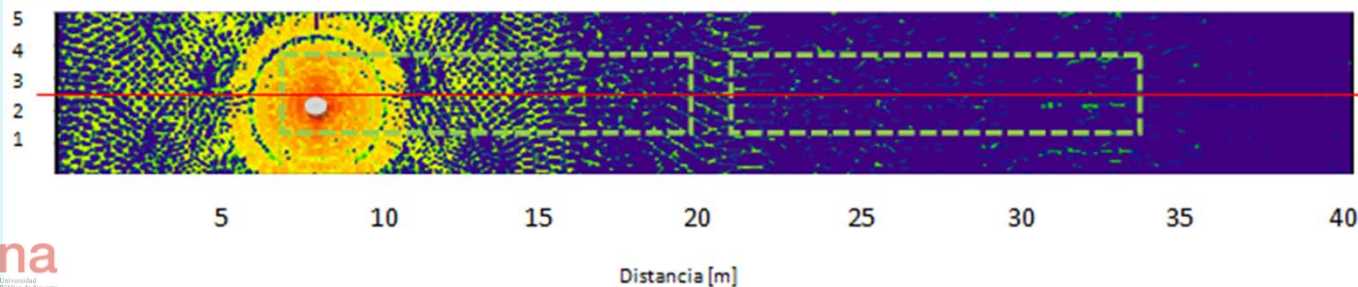
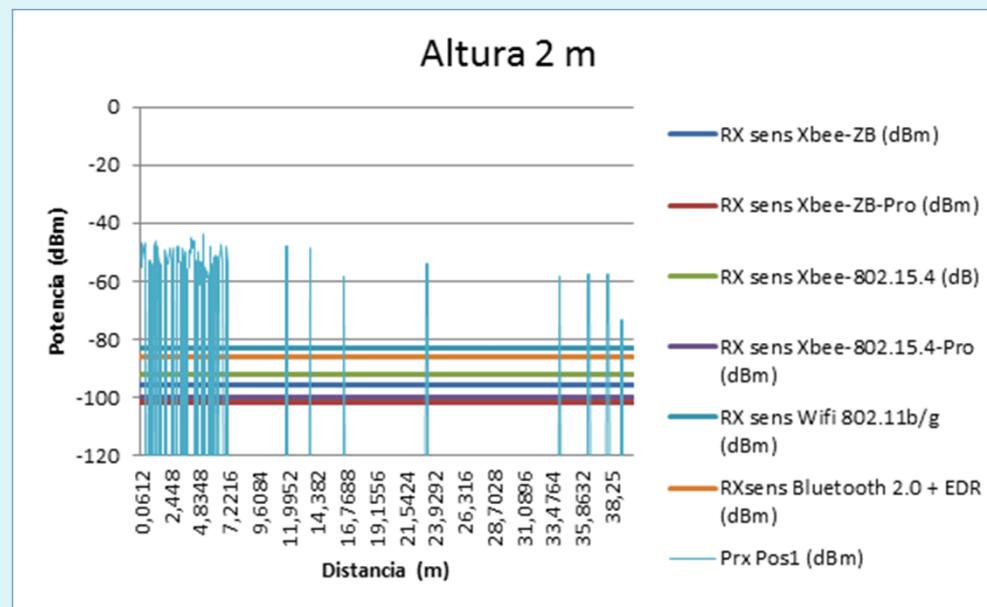
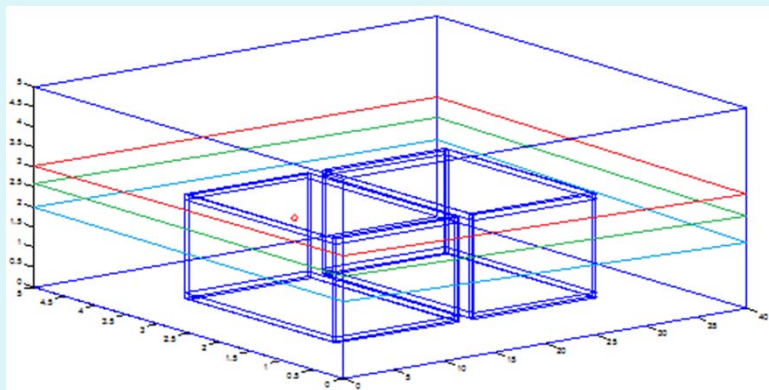


Modelo	Protocolo	Frecuencia	Tx Power	Sensibilidad	Rango*
XBee-802.15.4	802.15.4	2.4GHz	1mW	-92dB	500m
XBee-802.15.4-Pro	802.15.4	2.4GHz	100mW	-100dBm	7000m
XBee-ZB	Zigbee-Pro	2.4GHz	2mW	-96dBm	500m
XBee-ZB-Pro	Zigbee-Pro	2.4GHz	50mW	-102dBm	7000m
Wi-Fi	Wifi 802.11b/g	2.4GHz	0dBm - 12dBm	-83dBm	
Bluetooth Chip eUnistone 31308/2	Versión Bluetooth 2.0 + EDR	2.4GHz	2.5dBm	-86dBm	Outdoor 250m Indoor 30m

Análisis de los resultados

Respuesta del enlace radioeléctrico frente a la sensibilidad

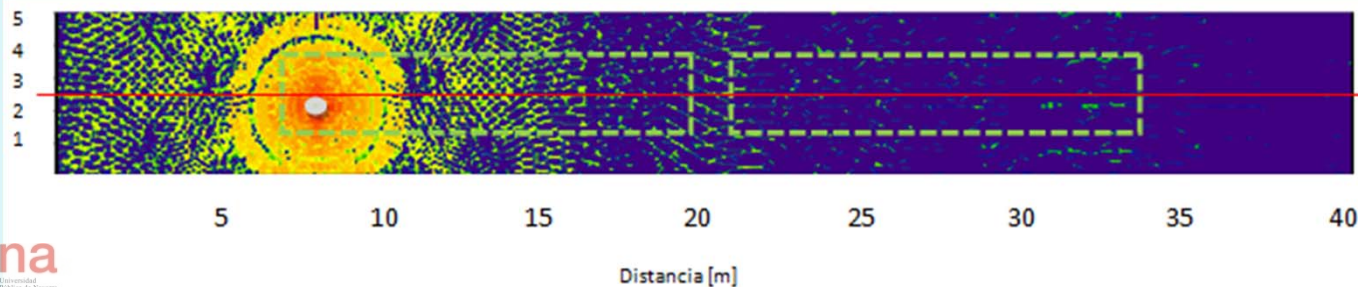
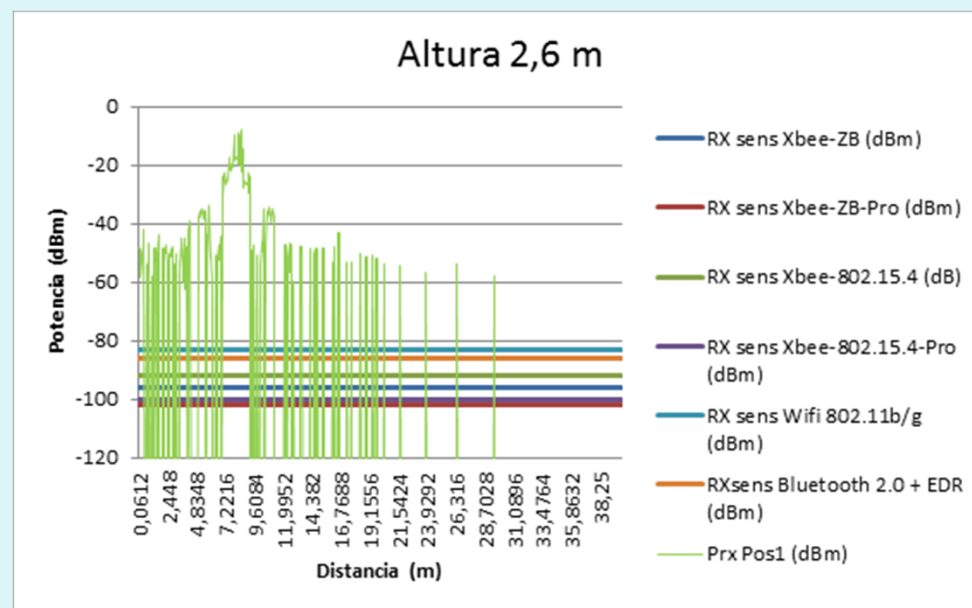
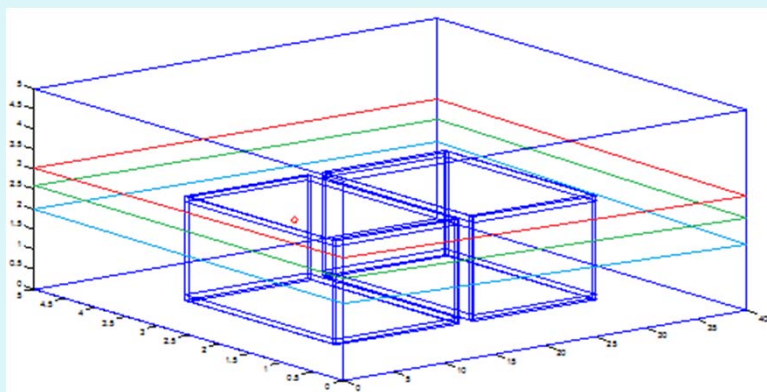
Altura de 2 m



Análisis de los resultados

Respuesta del enlace radioeléctrico frente a la sensibilidad

Altura de 2,6 m



Introducción

Objetivos

Estado del arte

Análisis de los resultados

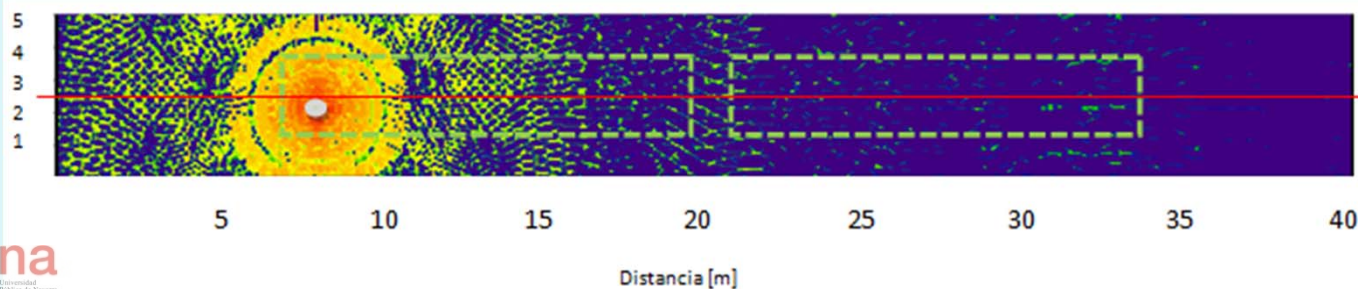
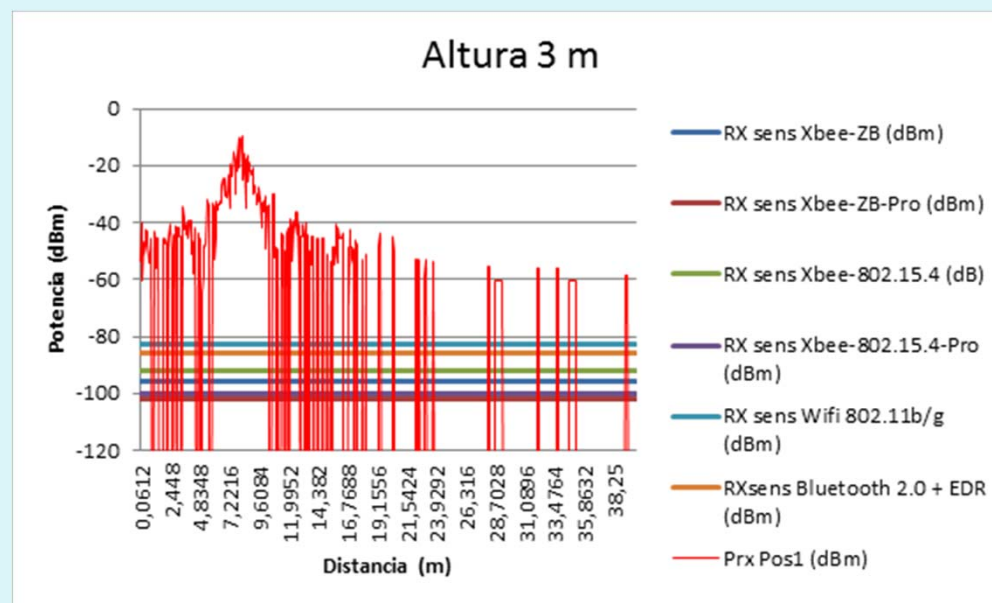
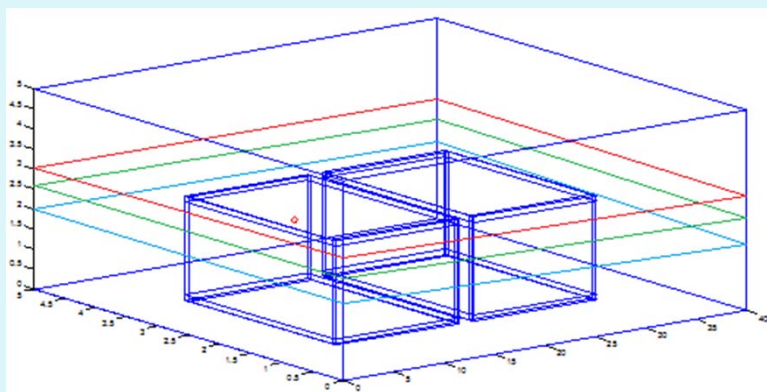
Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

Respuesta del enlace radioeléctrico frente a la sensibilidad

Altura de 3 m



Introducción

Objetivos

Estado del arte

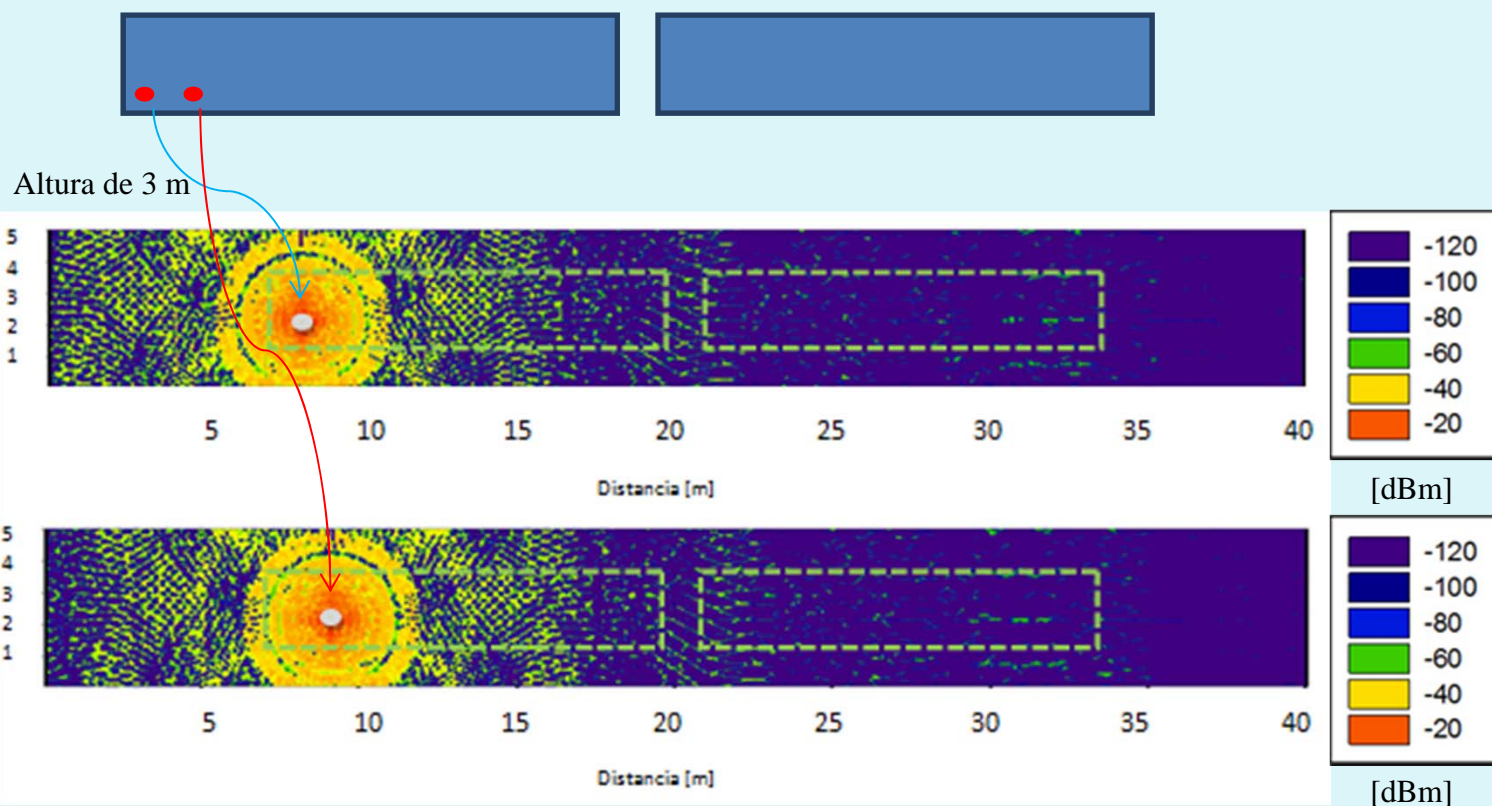
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

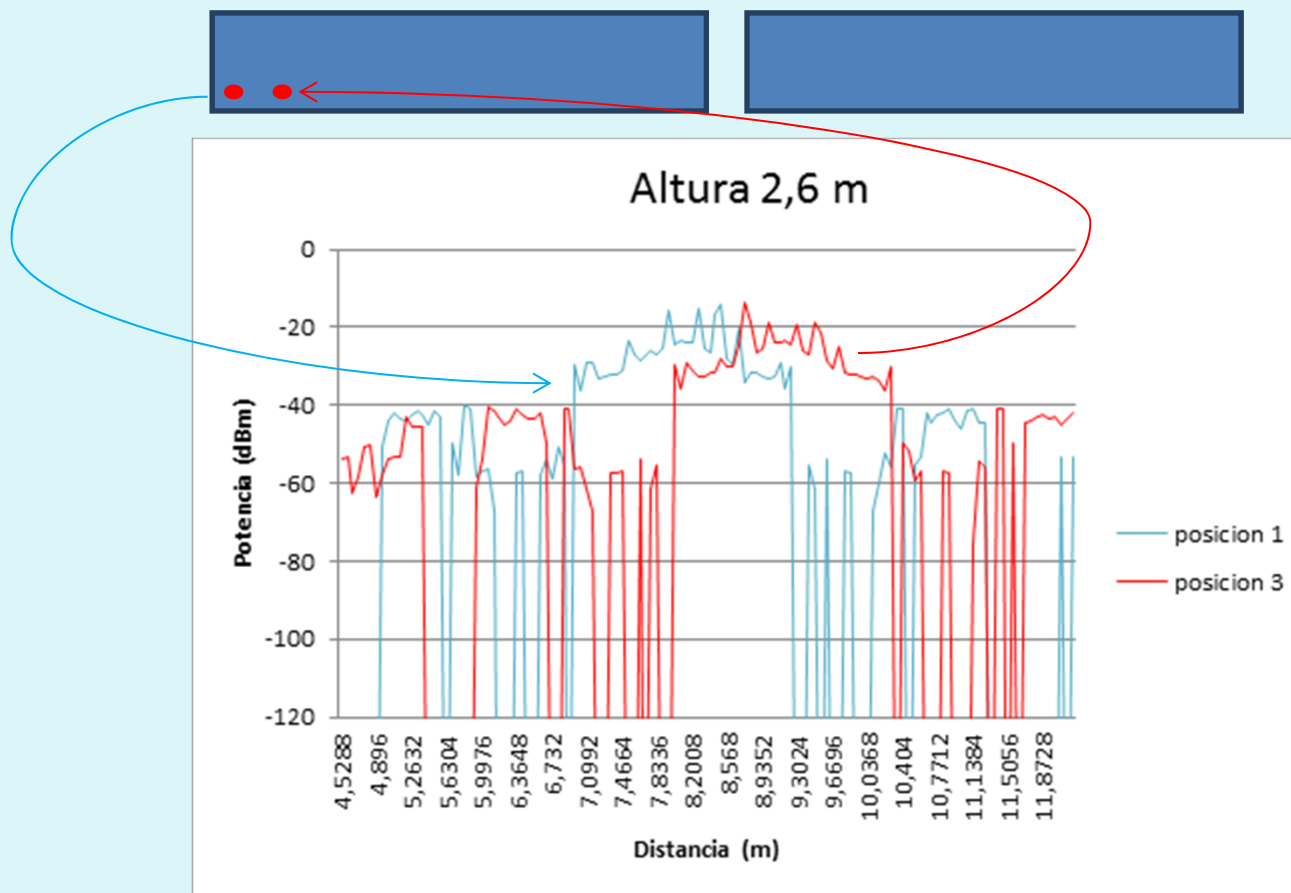
Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores





Análisis de los resultados

Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores



Introducción

Objetivos

Estado del arte

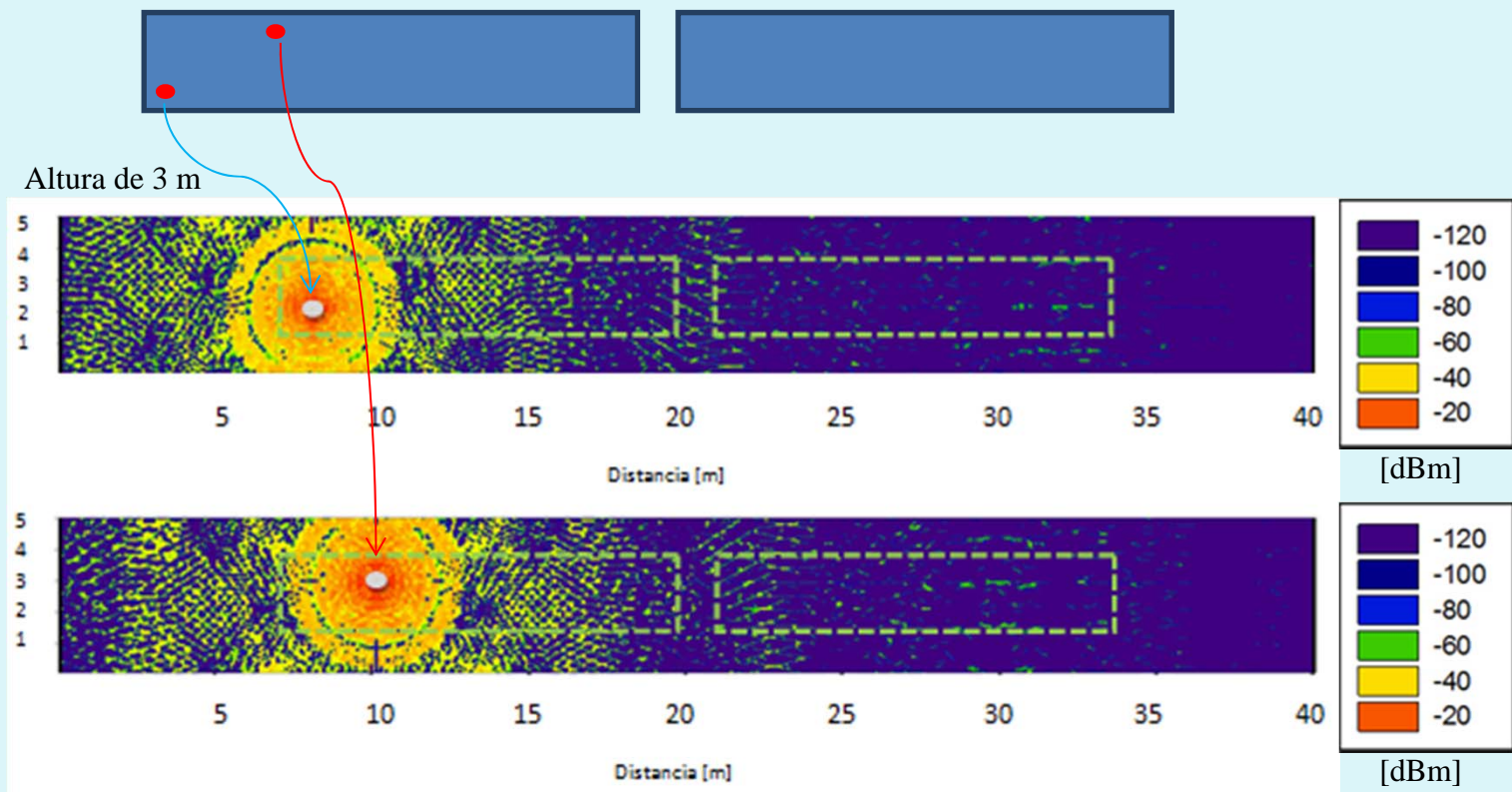
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

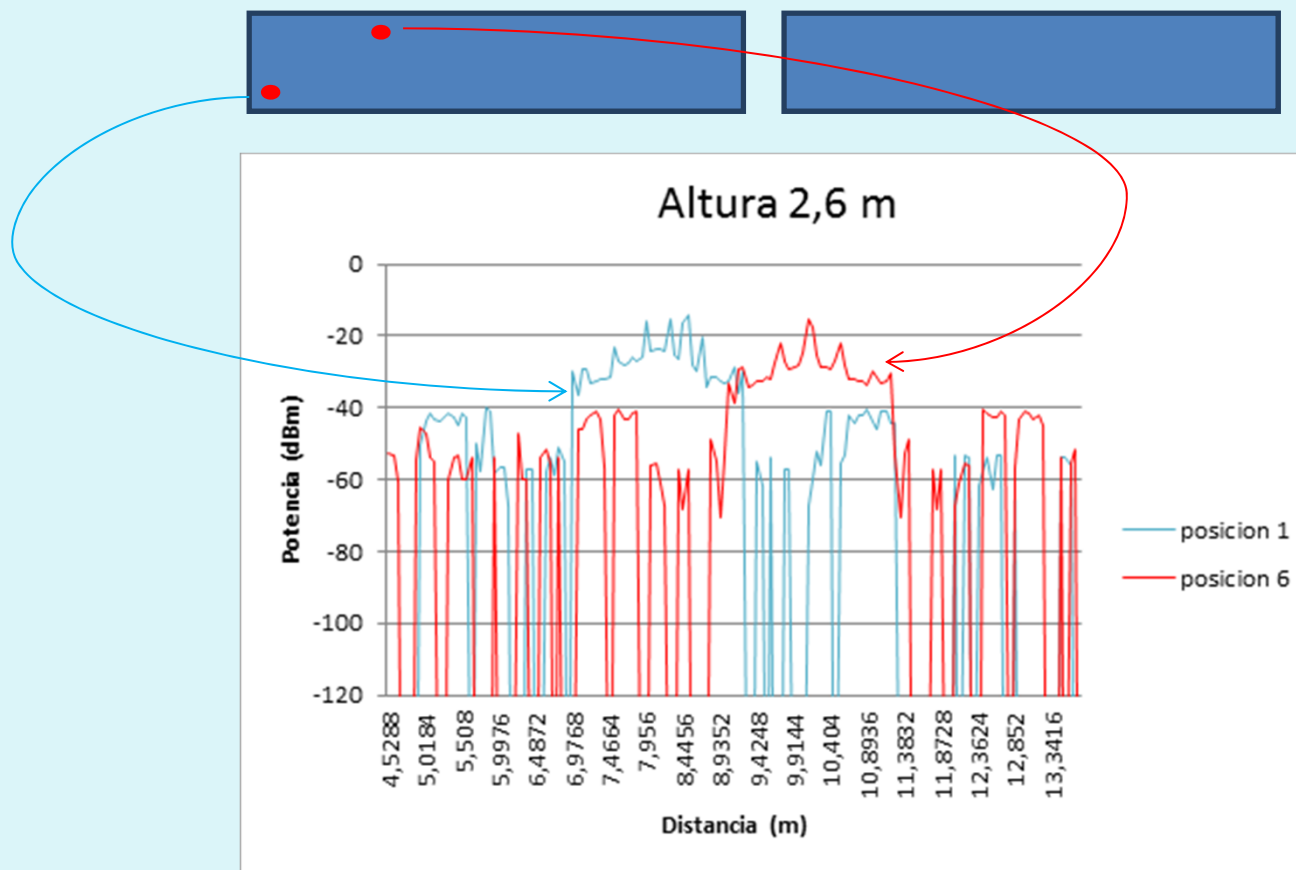
Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores





Análisis de los resultados

Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores



Introducción

Objetivos

Estado del arte

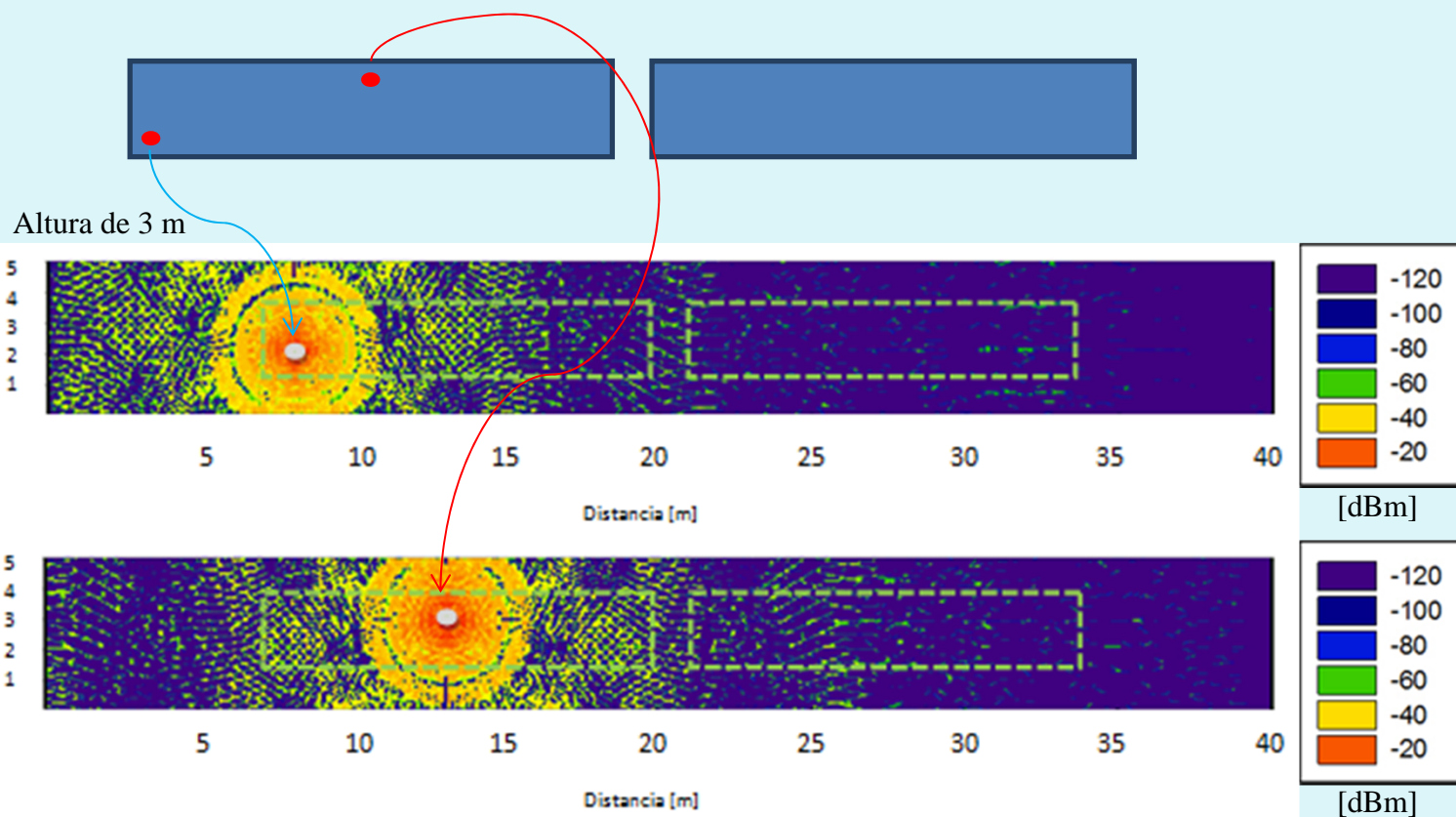
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

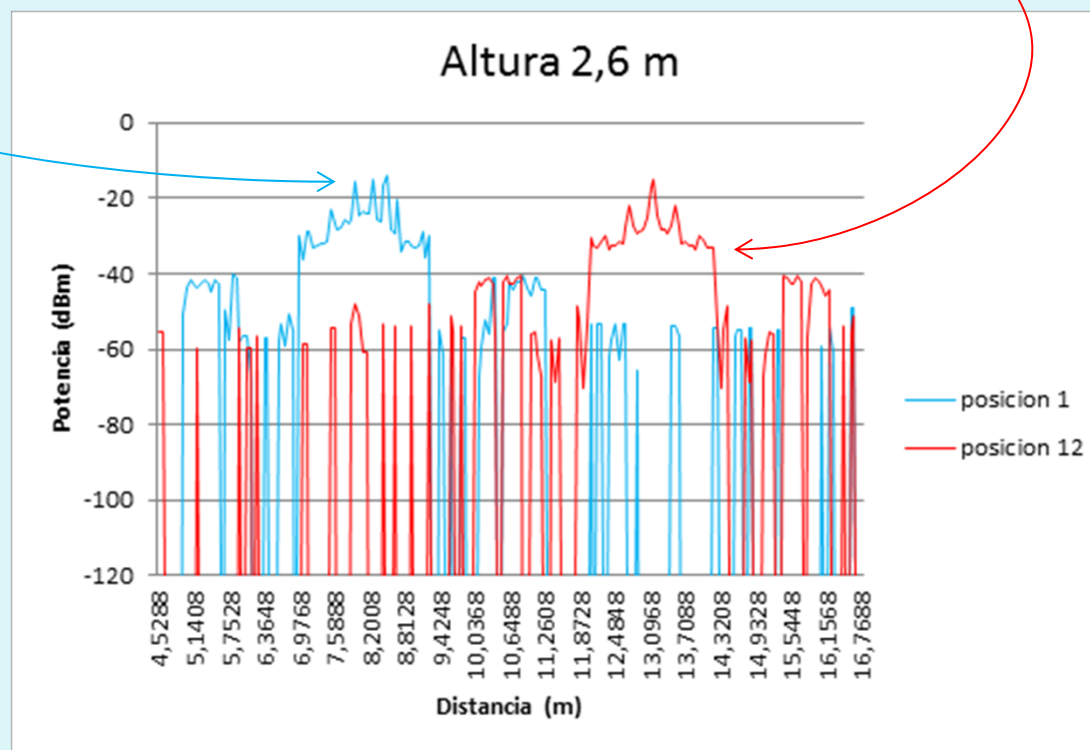
Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores





Análisis de los resultados

Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores



Introducción

Objetivos

Estado del arte

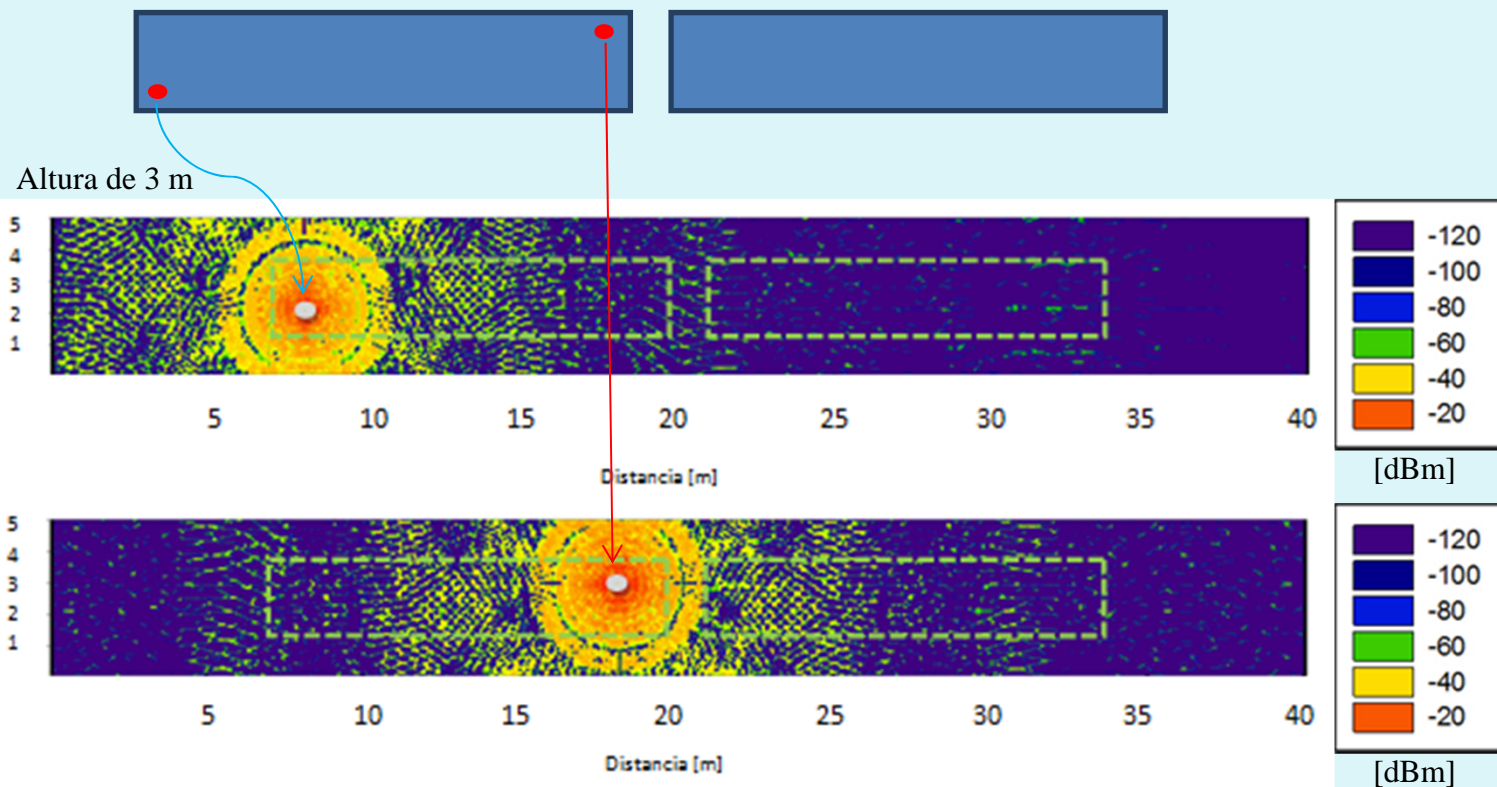
Análisis de los resultados

Conclusiones y líneas futuras



Análisis de los resultados

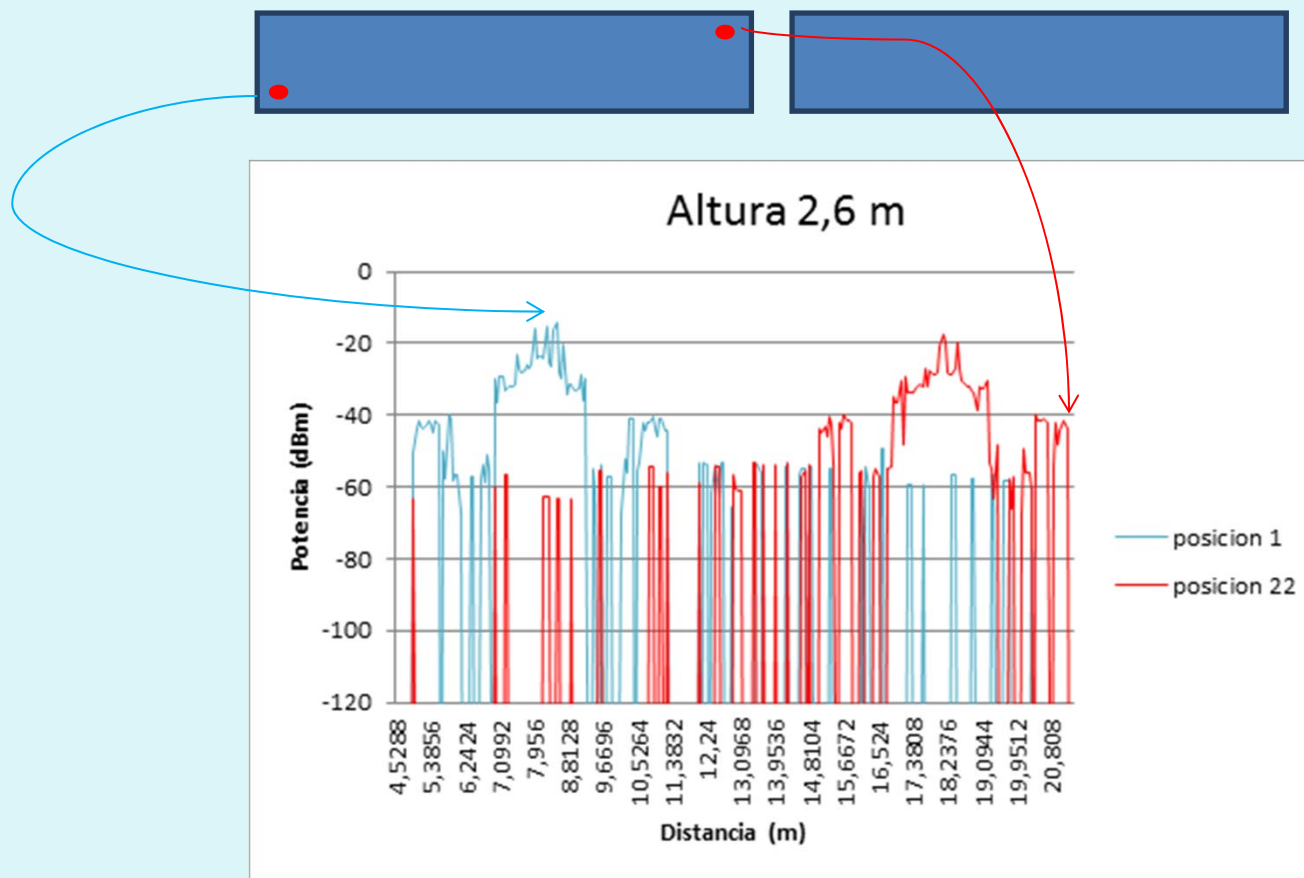
Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores





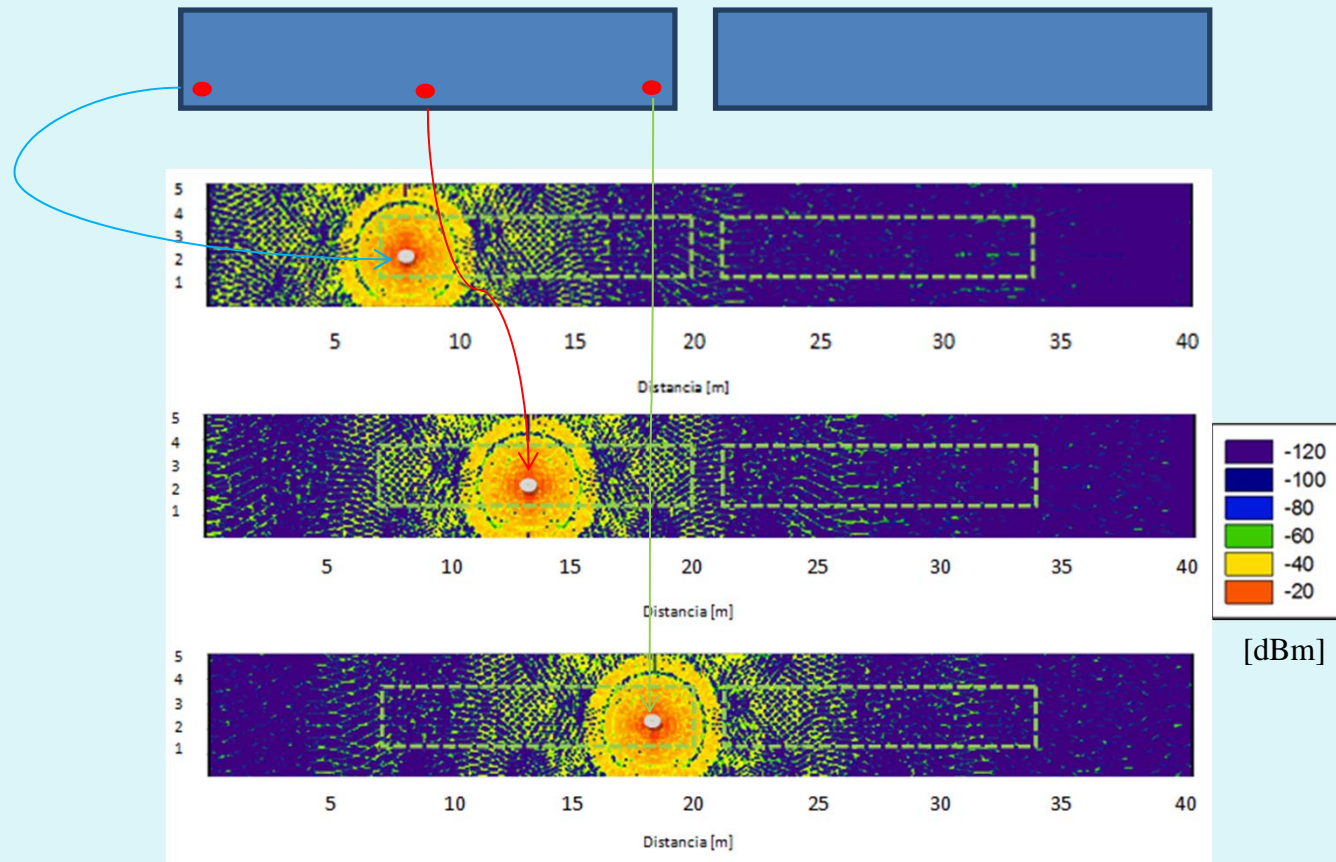
Análisis de los resultados

Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores



Análisis de los resultados

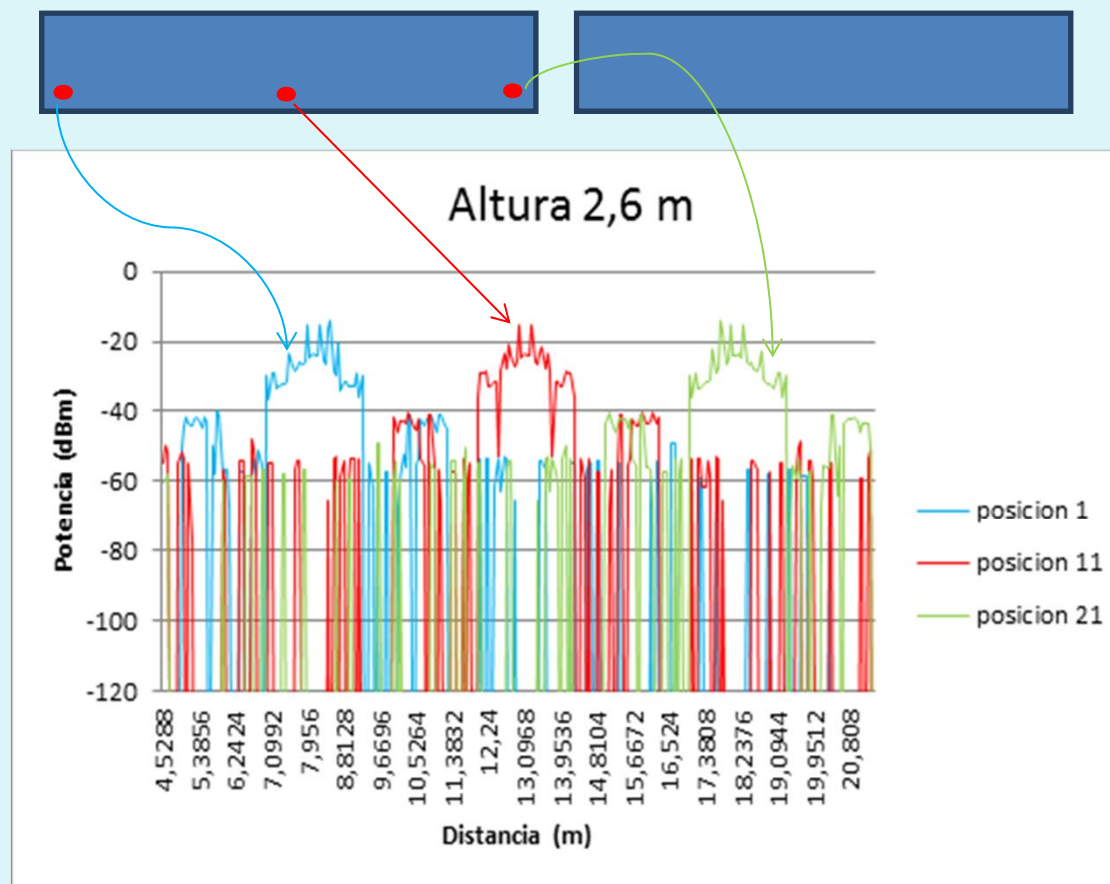
Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores





Análisis de los resultados

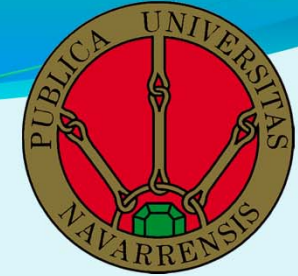
Estudio de las diferentes ubicaciones propuestas para los transeptores





Conclusiones y líneas futuras

- ✓ Fuerte dependencia topológica de los transceptores debida a la influencia de las componentes multitrayecto
- ✓ La respuesta del canal radioeléctrico es diferente y muestra una fuerte variación según la posición de los transceptores
- ✓ Los resultados pueden servir para establecer la correcta planificación de la red de sensores optimizándose para el caso de N vagones
- ✓ Otras planificaciones futuras utilizando mayor potencia de transmisión para las motas y a distinta frecuencia
- ✓ Estudio futuro para del canal radioeléctrico si se introducen elementos del entorno habituales en las vías ferroviarias como árboles, túneles, etc.



Contribuciones a Congreso Nacional

Publicaciones URSI Elche XXVII Simposium Nacional 2012



Caracterización del Canal Radioeléctrico Aplicado a la Interconexión de Vagones de Tren

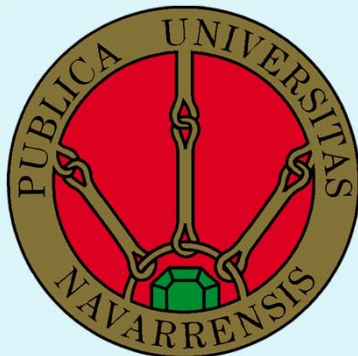
Caracterización del Canal Radioeléctrico en el Interior de un Vagón de Mercancías en el Sector Ferroviario

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Técnica de Telecomunicación

Aplicación de tecnologías inalámbricas de bajo consumo para entornos exteriores ferroviarios

¡Muchas gracias por su atención!



Autor: Víctor Garrido Calvo
Tutor: Francisco Javier Falcone Lanas